



มาตรฐานวิชาชีพเรื่อง ระบบหม้อไอน้ำ (The Boiler System)

สงวนลิขสิทธิ์

มาตรฐาน สกท คก xxxx-xx-xxxx

CODE STANDARD xx-xxxx-xx-xxxx

ISBN xxx-xxxx-xx-x

พิมพ์ครั้งที่ x

มีนาคม 25xx

บทนำ

สภาวิศวกรเป็นองค์กรวิชาชีพที่มีวัตถุประสงค์ในการส่งเสริมการวิจัยและการประกอบวิชาชีพของวิศวกร เพื่อให้เกิดความปลอดภัยด้านระบบหม้อไอน้ำ ซึ่งเป็นระบบที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมของประเทศ อาทิเช่น อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร การอบแห้ง การพิมพ์ และการซักรีด รวมถึงอุตสาหกรรมบริการ เช่น การผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อน ใช้งานในอาคาร โรงแรม โรงพยาบาล เป็นต้น เนื่องจากความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม ได้เกิดนวัตกรรมและการคิดค้นใหม่ๆ อย่างต่อเนื่องสภาวิศวกรจึงเล็งเห็นความจำเป็นในการจัดทำมาตรฐานนี้

มาตรฐานฉบับนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานด้านการออกแบบ ติดตั้ง และการตรวจสอบระบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับการประหยัพลังงานและเพื่อใช้ในประโยชน์จากไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(นายวิระ มาวิจักขณ์)

นายกสภาวิศวกร

คำนำ

มาตรฐานฉบับนี้ใช้เป็นหลักปฏิบัติสำหรับวิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานในงานด้านระบบหม้อไอน้ำ ซึ่งประกอบด้วย หม้อไอน้ำ ระบบท่อไอน้ำ และอุปกรณ์รับแรงดันไอน้ำ เพื่อให้เกิดความปลอดภัย ลดอันตรายและความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน ในส่วนบุคคลและสาธารณะ รวมถึงใช้เป็นแนวทางปฏิบัติในการตรวจสอบอุปกรณ์ เพื่อการใช้ประโยชน์จากไอน้ำได้สูงสุด

มาตรฐานระบบไอน้ำฉบับนี้จะประกอบด้วยรายละเอียดของการออกแบบ ติดตั้งหม้อไอน้ำ หรือเครื่องกำเนิดไอน้ำ ระบบท่อไอน้ำ จนวนความร้อน อุปกรณ์การแยกไอน้ำกลั่นตัว อุปกรณ์การใช้ไอน้ำ อาทิเช่น ภาชนะรับแรงดัน ในส่วนของรายละเอียด ของระบบหลัก ยังมีรายละเอียดของการปรับสภาพน้ำป้อน เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ อาทิเช่น เชื้อเพลิงแข็ง ถ่านหินไม้ กะลาปาล์ม แกลบ เชื้อเพลิงเหลว จำพวกน้ำมันเตา น้ำมันดีเซลต่างๆ หรือเชื้อเพลิงจำพวกก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียม ซึ่งมีการใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ในช่วงวิกฤตพลังงานที่ผ่านมา การกักเก็บเชื้อเพลิงชนิดต่างๆเหล่านั้น

ในส่วนระบบการระบายไอเสียซึ่งเป็นงานทางวิศวกรรมที่จะต้องให้ความสำคัญต่อปัญหาสภาวะแวดล้อม และระบบนิเวศน์วิทยาต่างๆร่วมกับงานสาขาอื่นๆ เพื่อรณรงค์ลดปัญหาผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นทั้งระยะสั้นและระยะยาวของการออกแบบระบบบำบัดมลพิษต่างๆ

การตรวจสอบระบบและการตรวจสอบความปลอดภัยของระบบซึ่งเป็นงานที่สำคัญ เพื่อให้ระบบเกิดความปลอดภัย รวมถึงเป็นการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อพัฒนาหลักปฏิบัติไปสู่การเป็นมาตรฐานสากลต่อไป

(นายวรากร ไม่เรียง)

ประธานอนุกรรมการจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพ

คณะกรรมการ

- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1. นายกมล วรรณบุตร | ประธานคณะกรรมการ |
| 2. นายพจน์ สัจจวนิช | กรรมการ |
| 3. นายเยาว์ มหัทธนกุล | กรรมการ |
| 4. นายบวร สัตวดีพงษ์ | กรรมการ |
| 5. นายจุลละพงษ์ จุลละโพธิ์ | กรรมการ |

คณะกรรมการร่างมาตรฐาน

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. นายเทียบ เอื้อกิจ | ประธานคณะกรรมการ |
| 2. นายธีรวัฒน์ ศรีนทุ | กรรมการ |
| 3. นายอรรถพร ฆารสมบุญ | กรรมการ |
| 4. นายจรัส จิรวินุลย์ | กรรมการ |
| 5. นายธีระศักดิ์ ประกายบุญทวี | กรรมการ |
| 6. นายสมเกียรติ บุญณะ | กรรมการ |
| 7. นายวัฒนศิลป์ ราชเดช | กรรมการ |
| 8. นายปราโมทย์ สมชัยยานนท์ | กรรมการ |
| 9. นายวิโรจน์ เชาว์จิรพันธุ์ | กรรมการ |
| 10. นายอรรถกร เทียมสระคู | กรรมการ |
| 11. นายสุรัช สนิทใจ | กรรมการและเลขานุการ |
| 12. นายชลภัทร ต้นประดิษฐ์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 13. นายมกร ลักษณะ | นักวิจัยโครงการ |

สารบัญ

หน่วยที่ 1	บทนำ.....	1
	1.1 มาตรฐานที่อ้างอิงต่างประเทศ.....	1
	1.2 มาตรฐานที่อ้างอิงในประเทศ.....	1
	1.3 กำหนดนิยาม.....	2
	1.4 ขอบเขตมาตรฐาน.....	3
	1.5 รายละเอียดโครงสร้างหม้อไอน้ำ.....	10
	1.6 เอกสารอ้างอิงและกิตติกรรมประกาศ.....	13
หน่วยที่ 2	หม้อไอน้ำ.....	14
	2.1 วัตถุประสงค์.....	14
	2.2 ขอบเขตและนิยาม.....	14
	2.3 ส่วนประกอบหลักของหม้อไอน้ำ.....	17
	2.4 ประเภทของหม้อไอน้ำ.....	18
	2.5 มาตรฐานการสร้างหม้อไอน้ำ.....	27
	2.6 อุปกรณ์ความปลอดภัยของหม้อไอน้ำ.....	30
	2.7 วิธีการติดตั้งหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ.....	37
	2.8 เอกสารอ้างอิง.....	42
หน่วยที่ 3	ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ.....	43
	3.1 วัตถุประสงค์.....	43
	3.2 ขอบเขตและนิยาม.....	43
	3.3 วัสดุที่ใช้สร้างภาชนะรับแรงดันไอน้ำ.....	43
	3.4 พื้นฐานของภาชนะรับแรงดันไอน้ำ.....	43
	3.5 หลักการทำงานของภาชนะรับแรงดันชนิดหม้ออบมาเชื้อ.....	44
	3.6 ชนิดของภาชนะรับแรงดันไอน้ำ.....	47
	3.7 การตรวจสภาพประจำปี.....	49
	3.8 การตรวจสอบความปลอดภัย.....	52
	3.9 เอกสารอ้างอิง.....	56
หน่วยที่ 4	การออกแบบติดตั้งระบบท่อไอน้ำ.....	57
	4.1 วัตถุประสงค์.....	57
	4.2 ขอบเขตและนิยาม.....	57
	4.3 วัสดุท่อ ข้อต่อและวาล์ว.....	57
	4.4 การกำหนดขนาดท่อไอน้ำและท่อไอน้ำกลั่นตัว.....	59
	4.5 การติดตั้งท่อประธานของท่อไอน้ำและท่อไอน้ำกลั่นตัว.....	63
	4.6 กัดกร่อนไอน้ำ.....	70
	4.7 เอกสารอ้างอิง.....	81
	4.8 ตารางและรูปภาพท้ายบท.....	82

หน่วยที่ 5	ฉนวน (Insulator).....	84
	5.1 วัสดุประสงค์.....	84
	5.2 ขอบเขตและนิยาม.....	84
	5.3 ความจำเป็นของฉนวนป้องกันความร้อน.....	84
	5.4 การเลือกใช้ฉนวนป้องกันความร้อน.....	85
	5.5 วัสดุที่ใช้ในการทำฉนวน.....	86
	5.6 คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อน.....	86
	5.7 การหาค่าความร้อนสูญเสียและความหนาฉนวนที่เหมาะสม.....	90
	5.8 การติดตั้งฉนวนป้องกันความร้อน.....	94
	5.9 ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้ฉนวน.....	95
	5.10 ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้ฉนวน.....	97
	5.11 การหุ้มฉนวนท่อ.....	98
	5.12 ปัญหาของการใช้ฉนวน.....	105
	5.13 ตัวอย่างการเลือกฉนวนและคำนวณการสูญเสียความร้อนก่อนและหลังหุ้มฉนวน.....	105
	5.14 เอกสารอ้างอิง.....	107
	ภาคผนวก.....	118
หน่วยที่ 6	คุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ.....	117
	6.1 วัสดุประสงค์.....	117
	6.2 ขอบเขตและนิยาม.....	117
	6.3 หลักการป้องกันการกัดกร่อนโลหะ.....	122
	6.4 หลักการควบคุมการสร้างตะกอน.....	122
	6.5 การปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ.....	122
	6.6 อุปกรณ์ทำความสะอาดน้ำภายนอกระบบ.....	125
	6.7 เอกสารอ้างอิง.....	132
หน่วยที่ 7	เชื้อเพลิงและการเผาไหม้.....	133
	7.1 วัสดุประสงค์.....	133
	7.2 ขอบเขตและนิยาม.....	133
	7.3 ประเภทและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง.....	134
	7.4 การคำนวณหาความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value).....	137
	7.5 การเผาไหม้.....	139
	7.6 หลักปฏิบัติในการวิเคราะห์การเผาไหม้.....	156
	7.7 การควบคุมดูแลการเผาไหม้.....	158
	7.8 ลักษณะทั่วไปของสถานที่เก็บน้ำมันเชื้อเพลิง.....	159
	7.9 ขนาดของถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง คำนวณขนาดของถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง.....	160
	7.10 เอกสารอ้างอิง.....	160
	ภาคผนวก.....	161
หน่วยที่ 8	การตรวจสอบสมรรถนะและความปลอดภัย.....	190
	8.1 วัสดุประสงค์.....	190
	8.2 ขอบเขตและนิยาม.....	190

	8.3 มาตรฐานในการใช้อ้างอิง.....	194
	8.4 สมดุลพลังงาน.....	207
	8.5 วิธีการตรวจสอบ และเกณฑ์การยอมรับ.....	219
	8.6 แนวทางการตรวจสอบหม้อไอน้ำประจำปี.....	229
	8.7 เอกสารอ้างอิง.....	239
หน่วยที่ 9	ระบบบำบัดไอเสีย.....	240
	9.1 วัตถุประสงค์.....	240
	9.2 ขอบเขตและนิยาม.....	240
	9.3 มาตรฐานและการควบคุม.....	241
	9.4 การกำจัดและควบคุมการปลดปล่อยเถ้าถ่านหิน.....	246
	9.5 การควบคุมผลกระทบจากกำมะถัน ในโตรเจน.....	256
	9.6 เอกสารอ้างอิง.....	261
หน่วยที่ 10	การใช้งานและการควบคุมหม้อไอน้ำ.....	262
	10.1 วัตถุประสงค์.....	262
	10.2 ขอบเขตและนิยาม.....	262
	10.3 การใช้งานหม้อไอน้ำให้มีความปลอดภัย.....	263
	10.4 การซื้อหม้อไอน้ำ.....	263
	10.5 การใช้งานหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม.....	263
	10.6 การซ่อมแซมหม้อไอน้ำ.....	268
	10.7 ขอบเขตการปฏิบัติงานของหน่วยรับรองวิศวกรด้านหม้อไอน้ำ.....	268
	10.8 การบำรุงรักษาและการเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ.....	269
	10.9 การควบคุมระดับน้ำในหม้อไอน้ำ.....	274
	10.10 การบำรุงรักษาด้านสัมผัสกับไฟ.....	277
	10.11 การตรวจสอบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ.....	279
	10.12 การบำรุงรักษาฝายหรือช่องคนลอด.....	280
	10.13 การจัดทำบันทึกรายงานประจำวันของหม้อไอน้ำ.....	281
	10.14 การเก็บรักษาหม้อไอน้ำ.....	281
	10.15 ระยะเวลาในการตรวจสอบและบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ.....	285
	10.16 การวางแผนการบำรุงรักษา.....	288
	10.17 สาเหตุหม้อไอน้ำระเบิด.....	289
	10.18 เอกสารอ้างอิง.....	290
หน่วยที่ 11	การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ.....	291
	11.1 วัตถุประสงค์.....	291
	11.2 ขอบเขตและนิยาม.....	291
	11.3 การวางแผนงานบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ.....	291
	11.4 การดูแลรักษาหม้อไอน้ำ.....	292
	11.5 เอกสารอ้างอิง.....	303
	ภาคผนวก.....	304
หน่วยที่ 12	การประเมินอายุหม้อไอน้ำและภาชนะรับแรงดัน.....	310

12.1	วัตถุประสงค์.....	310
12.2	ขอบเขตและนิยาม.....	310
12.3	การตรวจสอบเบื้องต้น.....	311
12.4	การตรวจสอบการสร้างจริง.....	311
12.5	การทดสอบในการเริ่มงาน.....	312
12.6	วิธีการประเมินอายุการใช้งานหม้อไอน้ำ.....	312
12.7	เอกสารอ้างอิง.....	318
ภาคผนวก.....		319
	ภาคผนวก ก ตารางแปลงหน่วย.....	319
	ภาคผนวก ข ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	321

หน่วยที่ 1 บทนำ

ร่างมาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพระบบหม้อไอน้ำนี้ได้ดำเนินการจัดทำร่างโดยอาศัยมาตรฐานการปฏิบัติงานของหลายประเทศ อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ เยอรมัน ออสเตรีย นิวซีแลนด์ ญี่ปุ่น อินเดีย จีน ฮองกง มาเลเซีย และสิงคโปร์ เป็นต้น ส่วนข้อกำหนดภายในประเทศ ซึ่งใช้เป็นบรรทัดฐาน และเอกสารอ้างอิงของกระทรวงที่รับผิดชอบ อาทิเช่น กระทรวงมหาดไทย กระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงพลังงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม ซึ่งมีระเบียบและแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัย อันจะเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี

1.1 มาตรฐานที่อ้างอิงต่างประเทศ

ในการจัดทำร่างมาตรฐาน คณะทำงานได้ศึกษาข้อมูลการจัดทำร่างจากต่างประเทศ ดังรายละเอียด

- 1.1.1 American Society of Mechanical Engineers (ASME) Standard Boiler and Pressure Vessel Code, 2007
- 1.1.2 Technical Rules for Steam Boilers (TRD) (German Standard)
- 1.1.3 British Standards Institution (BSI)
- 1.1.4 Standardization Administration of China (SAC) Code GB
- 1.1.5 International Organization for Standardization (ISO) TC 11 Boiler and Pressure Vessels
- 1.1.6 American Petroleum Institute (API) Standard
- 1.1.7 Japanese Industrial Standards (JIS) Standard
- 1.1.8 Department of Standard Malaysia , IS F Standard (Malaysia Standard)
- 1.1.9 Bureau of Indian Standard (BIS)
- 1.1.10 Productivity and Standards Board (PSB) (Singapore Standard)
- 1.1.11 National Fire Protection Association (NFPA) 850 Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations
- 1.1.12 Shanghai Power Equipment Research Institute, 1998
- 1.1.13 Approved Code of Practice for Pressure Equipment (Excluding Boiler), 1996
- 1.1.14 Approved Code of Practice for The Design, Safe, Operation, Maintenance and Servicing Boiler, 2001
- 1.1.15 Deutsche Institute fur Normung, e.v. (DIN)
- 1.1.16 American Society for Testing and Materials (ASTM)
- 1.1.17 American National Standards Institute (ANSI)

1.2 มาตรฐานที่อ้างอิงในประเทศ

สำหรับร่างมาตรฐานได้ศึกษารายละเอียด ข้อกำหนด แนวทางปฏิบัติต่างๆ ตามข้อกำหนดและประกาศต่างๆของหน่วยงานที่รับผิดชอบ ดังรายละเอียด

- 1.2.1 กฎกระทรวง กำหนด มาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำและหม้อต้มและภาชนะรับแรงดันในโรงงานที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อถ่ายเทความร้อน พ.ศ. 2549
- 1.2.2 กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร ปั่นจั่น และหม้อไอน้ำ พ.ศ. 2552

- 1.2.3 กฎข้อบังคับ สำหรับ การตรวจเซอร์เวย์เรือ ภาคที่ 1 พ.ศ. 2457 และฉบับแก้ไขเพิ่มเติมโดย ประกาศ กรมเจ้าท่า ลงวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2465
- 1.2.4 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง อุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับหม้อน้ำและหม้อต้มและภาชนะรับแรงดัน ในโรงงานที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549
- 1.2.5 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง คุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549
- 1.2.6 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณเขม่าควันที่เจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของ หม้อน้ำของโรงงาน พ.ศ. 2549
- 1.2.7 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณเขม่าควันที่เจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของ หม้อน้ำของโรงงาน พ.ศ. 2549
- 1.2.8 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณเขม่าควันที่เจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของ หม้อน้ำของโรงสีข้าวที่ใช้เกล็ดเป็นเชื้อเพลิง พ.ศ. 2549
- 1.2.9 ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับหม้อน้ำ พ.ศ. 2534
- 1.2.10 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 855-2532 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- 1.2.11 มาตรฐานระบบไอน้ำ, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2540

1.3 กำหนดนิยาม

- 1.3.1 หม้อไอน้ำ หมายถึง ภาชนะปิดที่ใช้ผลิตไอน้ำ ที่มีความดันสูงกว่าบรรยากาศ โดยใช้ความร้อนจากการสันดาป ของเชื้อเพลิงหรือจากไฟฟ้าหรือพลังงานนิวเคลียร์
- 1.3.2 ผิวรับความร้อน หมายถึง พื้นผิวโลหะหรือวัสดุรับความร้อนของหม้อไอน้ำที่สัมผัสกับก๊าซสันดาป โดยมีพื้นที่ ผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งเป็นน้ำ
- 1.3.3 หนึ่งตันหม้อไอน้ำ หมายถึง ความสามารถในการผลิตไอน้ำจำนวน 1000 kg ณ อุณหภูมิ 100 °C ที่ความดัน บรรยากาศ โดยใช้เวลา 1 ชั่วโมง หรือเทียบเป็นอัตราความร้อนเท่ากับ 626.94 kW
- 1.3.4 หนึ่งแรงม้าหม้อไอน้ำ หมายถึง ความสามารถของหม้อไอน้ำในการระเหยน้ำจำนวน 15.4 kg (34.5 lbm) ที่ อุณหภูมิ 100 °C (212 °F) ให้กลายเป็นไอน้ำ ณ อุณหภูมิเดียวกันภายใน 1 ชั่วโมง หรือเทียบเท่ากับ 9.819 kW
- 1.3.5 พิกัดหม้อไอน้ำ หมายถึง อัตราการผลิตไอน้ำต่อหน่วยเวลา อาจกำหนดเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) หรือ ตัน ต่อชั่วโมง (Ton/hr) ก็ได้
- 1.3.6 ก๊าซสันดาป หมายถึง ก๊าซไอเสียจากการสันดาปเชื้อเพลิงต่างๆ
- 1.3.7 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ หมายถึง ภาชนะปิดบรรจุไอน้ำเพื่อการควบแน่นหรือแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีความดันสูงกว่าบรรยากาศ
- 1.3.8 ท่อไอน้ำ หมายถึง ท่อที่นำไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศปกติ และรวมถึงอุปกรณ์ประกอบ เพื่อป้องกันการยืดหรือหดตัว
- 1.3.9 ฉนวน หมายถึง ฉนวนกันความร้อนที่ใช้กับหม้อไอน้ำ ท่อไอน้ำ ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ และอุปกรณ์ประกอบ ในระบบอื่นๆ
- 1.3.10 การประเมินอายุหม้อไอน้ำและภาชนะรับแรงดันไอน้ำ หมายถึง การทำนายอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำและ ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ จากสภาวะการทำงานปกติ โดยพิจารณาสมบัติทางกลของวัสดุเป็นเกณฑ์การประเมิน

1.4 ขอบเขตมาตรฐาน

ขอบเขตมาตรฐานระบบหม้อไอน้ำจะกล่าวเฉพาะหม้อไอน้ำที่ใช้ผลิตไอน้ำเพื่องานอุตสาหกรรม ซึ่งมีใช้งานหลากหลายแบบ อาทิเช่น หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำตั้งหรือแบบไหลทางเดียว (Once Through Boiler) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการใช้งานดังนี้

1.4.1 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

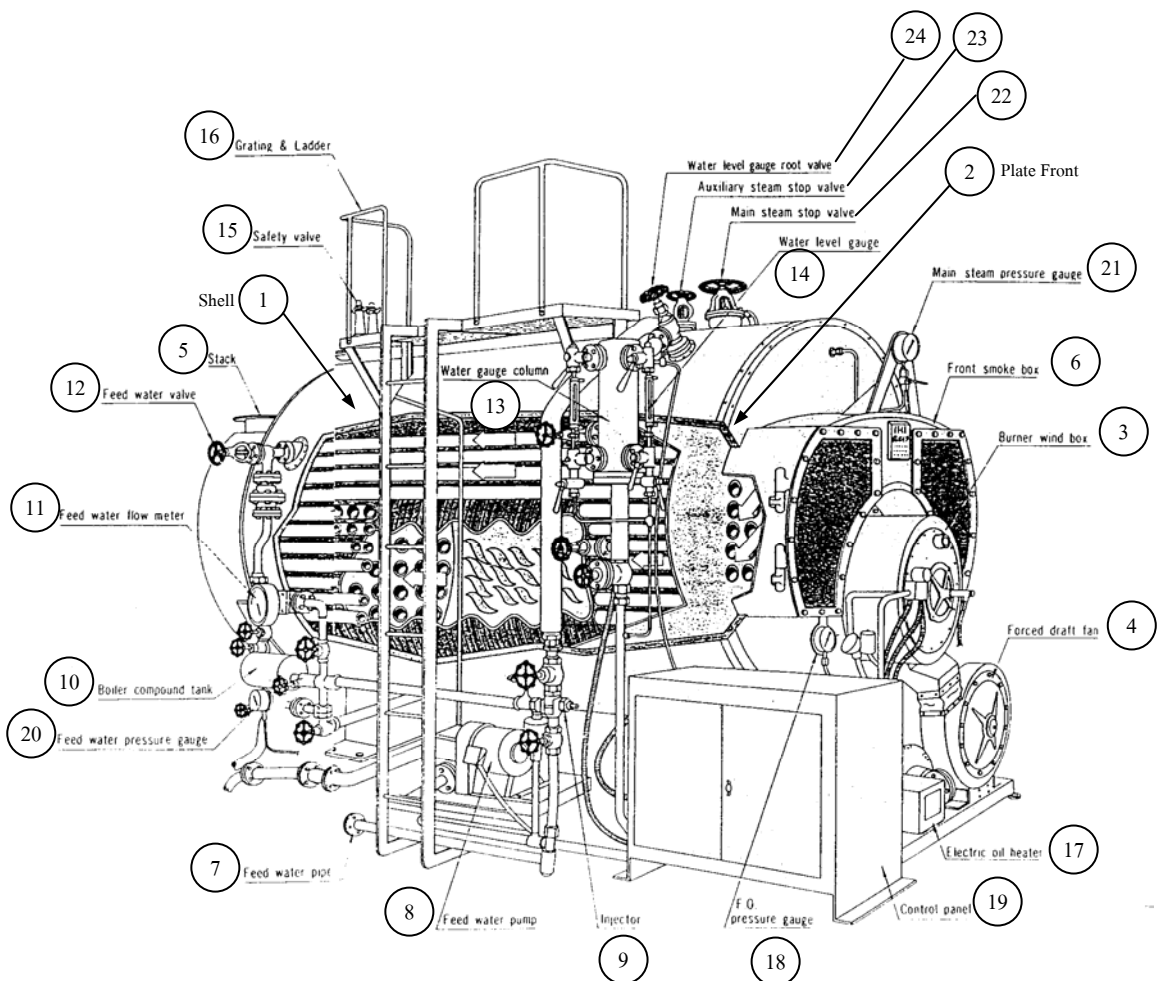
หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกับอุตสาหกรรมการผลิตหรืออุตสาหกรรมบริการ มีโครงสร้างและอุปกรณ์ส่วนรอบ ดังรูปที่ 1.1 ลักษณะจะมีเปลือกทรงกระบอก โดยมีฝาปิดด้านหน้า ด้านหลัง และมีท่อไฟใหญ่ ซึ่งจะมีหัวเผาประกอบอยู่ด้านหน้า เปลวไฟหรือก๊าซร้อนซึ่งเกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงในหัวเผาย่อมถ่ายเทความร้อนให้กับผนังท่อใหญ่และไหลผ่านไปถ่ายเทความร้อนในท่อเล็กกลับที่ 2 และกลับที่ 3 ให้กับน้ำ ก่อนก๊าซร้อนจะถูกปล่อยออกไปทางปล่องควัน ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนให้กับสื่อน้ำที่บรรจุในเปลือกหม้อไอน้ำ อุณหภูมิของเปลวส่วนใหญ่จะสูงกว่า 800°C และเมื่อระบายออกปล่องควันแล้วจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ $150 - 200^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบระบบการสันดาปของ เชื้อเพลิงซึ่งอาจใช้เชื้อเพลิงกลุ่มน้ำมันเตา ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (แอลพีจี) หรือ ก๊าซชีวมวล หรือกลุ่มเชื้อเพลิงแข็ง อาทิเช่น ถ่านหิน ไม้ กะลาปาล์ม เป็นต้น สำหรับหม้อไอน้ำขนาดเล็ก อาจใช้น้ำมันดีเซลก็ได้



รูปที่ 1.1 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

สำหรับโครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบหลักของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟมีรายการหลักๆ ดังรูปที่ 1.2 เปลือก หมายเลข 1 แผ่นหน้า และ แผ่นหลัง หมายเลข 2 จะเป็นชิ้นส่วนที่สามารถรองรับความดันภายใน ความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งตามแนวยาวและแนวเส้นรอบวงได้ หมายเลข 3 เป็นหัวเผาและกล่องลมโดยจะมีอุปกรณ์ส่วนควบคุมรวมกัน หมายเลข 4 เป็นพัดลมเป่าอากาศเพื่อช่วยให้อัตราการสันดาปของเชื้อเพลิงสมบูรณ์ และจะได้ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ จนกระทั่งไอเสียถูกระบายออกทางปล่องควันหมายเลข 5 เชื้อเพลิงโดยเฉพาะน้ำมัน

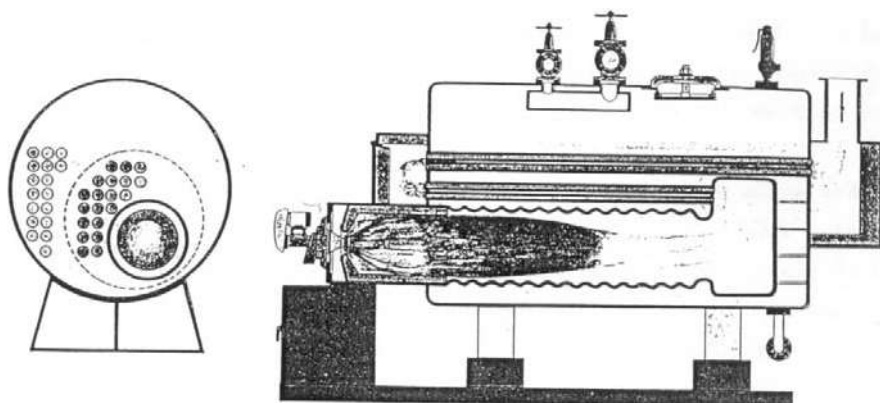
เตาจะถูกอุ่นให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าหมายเลข 17 สำหรับน้ำป้อนจะถูกส่งจากระบบทำน้ำอ่อน ผ่านท่อหมายเลข 7 โดยปั้มน้ำหมายเลข 8 บางครั้งอาจมีการอุ่นน้ำป้อนด้วยหัวฉีดไอน้ำหมายเลข 9 ในถังผสมและกักเก็บหมายเลข 10 ก่อนก่อนส่งผ่านมาตรวัดน้ำ หมายเลข 11 ผ่านวาล์วหมายเลข 12 เข้าในหม้อไอน้ำ การรักษาระดับน้ำในเปลือกจะต้องมีระดับสูงกว่าท่อไฟกลับสุดท้าย โดยมีชุดอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ ซึ่งปกติจะเป็นหลอดแก้วพร้อมวาล์วบังคับเพื่อการสังเกตและการตรวจสอบระดับน้ำหมายเลข 13 และ 14 สำหรับการตรวจสอบความดันไอน้ำในหม้อไอน้ำจะใช้เกจวัดความดันหมายเลข 20 โดยมาตรฐานหม้อไอน้ำจะต้องออกแบบให้มีชุดควบคุมความดันใช้งานอยู่เสมอ ส่วนระบบความปลอดภัยเพื่อป้องกันความดันการใช้งานเกินพิกัดจะต้องมีลิ้นนิรภัยหมายเลข 15 เพื่อระบายความดันไอที่สูงเกินค่าความปลอดภัยของโครงสร้างที่จะรับได้อย่างน้อยหนึ่งชุดเสมอ



รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

ในการควบคุมการทำงานหม้อไอน้ำ ผู้ควบคุมสามารถใช้บันไดหมายเลข 16 เพื่อดำเนินการตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ต่างๆ ได้สะดวก ส่วนไอน้ำที่ผลิตได้ ณ ความดันกำหนดจะถูกส่งผ่านวาล์วประธาน หมายเลข 21 ไปใช้งานในกระบวนการต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ สำหรับการควบคุมระบบและอุปกรณ์ส่วนควบต่างๆ ของหม้อไอน้ำจะมีชุดควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าหมายเลข 19 คอยสั่งงานอยู่ ในหม้อไอน้ำบางแบบอาจมีการ

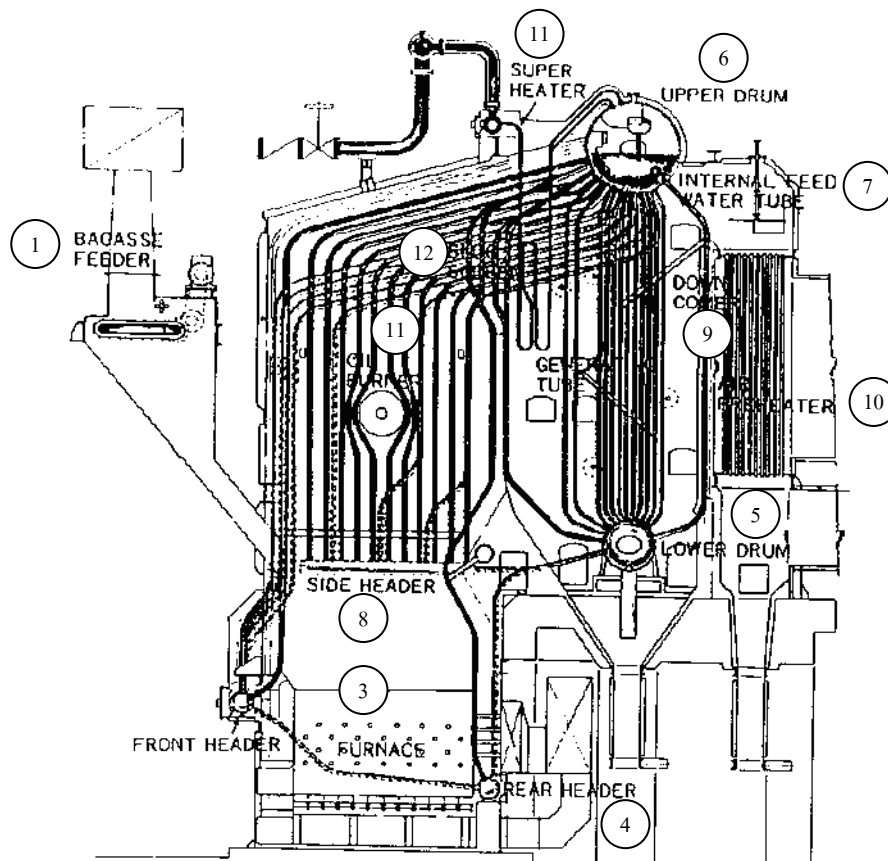
ติดตั้งท่อไอน้ำช่วย หมายเลข 22 เพื่อช่วยจ่ายไอน้ำร่วมกับท่อประธาน สำหรับเปลวไฟจากการสันดาปหรือก๊าซร้อน จากหัวเผาหรือเตาจะมีลักษณะการไหลของก๊าซ ดังรูปที่ 1.3 โดยเป็นหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ 3 กลับ



รูปที่ 1.3 การไหลของเปลวไฟในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟไหล 3 กลับ

1.4.2 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำดังรูปที่ 1.4 ส่วนใหญ่จะออกแบบให้มีถังรวมน้ำด้านล่าง หมายเลข 5 และถังรวมไอน้ำด้านบน หมายเลข 6 ซึ่งเป็นหม้อไอน้ำซึ่งผลิตไอร้อนยิ่งยวด ลักษณะของหม้อไอน้ำแบบนี้จะสามารถผลิตไอน้ำได้ความดันสูงๆและจะมีการนำเอาความร้อนจากก๊าซร้อนที่จะปล่อยทิ้งทางปล่องควันกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก โดยจะแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านชุดอุ่นอากาศหมายเลข 10 หรือผ่านชุดอุ่นน้ำเลี้ยงก่อนส่งเชื้อหม้อไอน้ำในระบบการไหลของไอลือหรือก๊าซร้อน จะออกแบบให้มีกลุ่มของท่อน้ำ หรือมีท่อร่วมหลายแห่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนหมายเลข 8 ,11 และ 12 โดยปลายของท่อส่วนใหญ่จะรวมกันที่ ถังรวมน้ำด้านล่างและถังรวมไอน้ำด้านบนดังกล่าวแล้ว ไอน้ำอัดตัวจากถังรวมไอน้ำบนจะส่งไอน้ำผ่านเข้าสู่ชุดเพิ่มอุณหภูมิ หมายเลข 11 เพื่อให้ไอน้ำเป็นไอร้อนยิ่งยวด ก่อนออกไปยังกระบวนการผลิตหรือกระบวนการใช้ไอน้ำโดยปกติหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำจะเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของโรงไฟฟ้า เชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นเชื้อเพลิงแข็งโดยส่งผ่านชุดป้อน หมายเลข 1 ลงในเตาหมายเลข 3 และเกิดการสันดาปบนตะแกรงเตา



รูปที่ 1.4 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำเชื่อเพลิงแข็ง

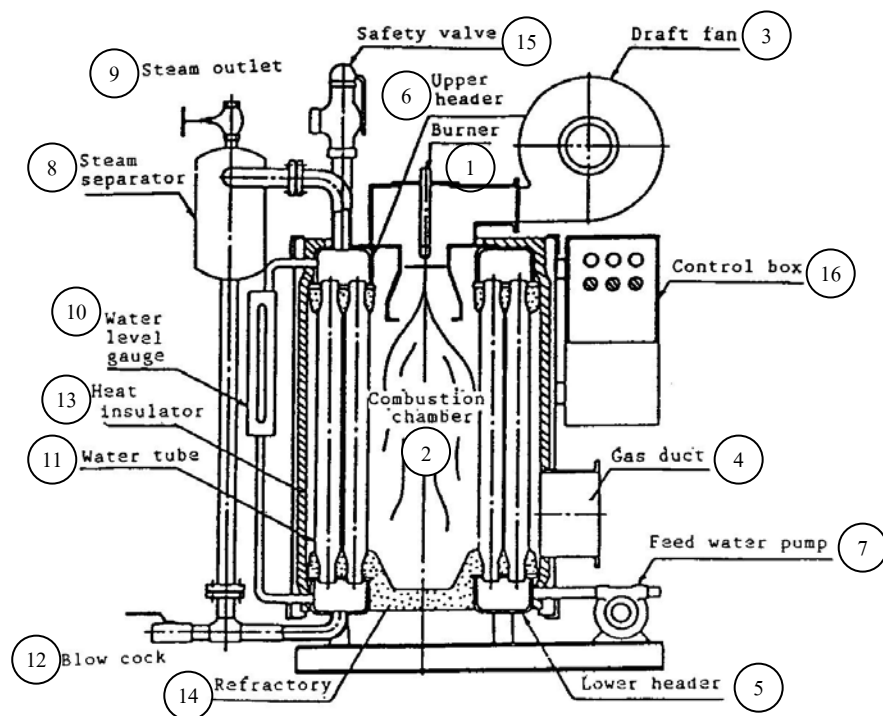
เปลวหรือก๊าซร้อนที่ไหลผ่านกลุ่มท่อน้ำขึ้นด้านบนจะถ่ายเทความร้อนให้กับกลุ่มท่อน้ำหลังหมายเลข 9 ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและระบายออกปล่องควันต่อไป สำหรับระบบการควบคุมการทำงาน และการตรวจสอบก็จะแตกต่างกับหม้อแบบท่อไฟ

1.4.3 หม้อน้ำแบบท่อน้ำตั้ง

หม้อน้ำแบบท่อน้ำวางตั้งบางครั้งเรียกว่า หม้อน้ำเปลวไฟไหลทางเดียว (Once Through Boiler) ดังรูปที่ 1.5 ซึ่งก็เป็นหม้อไอน้ำที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไป ซึ่งจะผลิตไอน้ำให้ทันต่อความต้องการ โดยความสามารถในการผลิตไอน้ำ จะเริ่มตั้งแต่ 50 kg/hr จนถึง 4,000 kg/hr สำหรับการทำงานของหม้อไอน้ำแบบนี้สามารถอธิบายจากรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.5 หม้อน้ำแบบท่อวางตั้ง



รูปที่ 1.6 การทำงานของหม้อไอน้ำแบบท่อวางตั้ง

สำหรับอุปกรณ์ประกอบและการทำงานหม้อไอน้ำที่ติดตั้งนี้ จะประกอบด้วยหัวเผาหมายเลข 1 เชื้อเพลิงจะถูกสันดาปในห้องเผาไหม้หมายเลข 2 อากาศซึ่งจะถูกป้อนด้วยพัดลมหมายเลข 3 เมื่อสันดาปแล้ว ก๊าซร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในกลุ่มท่อน้ำหมายเลข 11 โดยท่อน้ำจะเชื่อมต่อถึงรวมน้ำด้านล่างหมายเลข 5 กับถึงรวมไอน้ำด้านบนหมายเลข 6 เมื่อแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ก๊าซร้อนจะไหลผ่านท่อต่อหมายเลข 4 ระบายออกไปยังปล่องควัน ส่วนน้ำป้อนจากถังสะสมจะถูกส่งโดยปั๊มหมายเลข 7 เข้าสู่หม้อไอน้ำ น้ำที่ถึงรวมด้านล่างที่เดือดเป็นไอแล้วจะสะสมในถังรวมไอน้ำด้านบน เพื่อส่งต่อไปยังถังแยกไอน้ำหมายเลข 7 และผ่านวาล์วประจักษ์หมายเลข 9 ไปสู่กระบวนการผลิตต่างๆ ส่วนการควบคุมระดับน้ำจะมีชุดควบคุมระดับน้ำซึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำงานผ่านชุดควบคุมหมายเลข 16 ส่วนหลอดแก้วดูระดับน้ำหมายเลข 10 ใช้ตรวจสอบการทำงานปกติของหม้อไอน้ำ สำหรับหม้อไอน้ำมาตรฐานจะมีลิ้นนิรภัย หมายเลข 15 เพื่อระบายความดันตามขนาดพิกัดของหม้อไอน้ำ ติดตั้งไว้ส่วนบนสุดของถังรวมด้านบนเสมอ

1.4.4 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ

ภาชนะรับแรงดันไอน้ำเป็นอุปกรณ์การใช้ไอน้ำ ซึ่งจะมีความดันสูงกว่าบรรยากาศปกติ บางแบบอาจสูงกว่า 2.0 MPa มีการใช้งานและเรียกชื่อในหลายลักษณะการใช้งาน อาทิ เช่น หม้ออบฆ่าเชื้อ (Retort) ถังอบความดัน (Autoclave) หรือหม้อนึ่ง (Steam Cooker) เป็นต้น โดยอาจใช้งานทั้งในงานอุตสาหกรรม หลากหลายประเภท อาทิเช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตมวลเบา หรือการอบลูกกลิ้งอุตสาหกรรมต่างๆ หรืออาจใช้งานร่วมกับน้ำร้อนและไอน้ำหรือน้ำเย็นก็ได้เช่น ดังรูปที่ 1.7 เป็นภาชนะรับแรงดัน ใช้อบฆ่าเชื้อปลากระป๋อง มีลักษณะเป็นเปลือกทรงกระบอกมีฝาปิดทรงโค้ง เปิดด้านเดียว และจับยึดด้วยการเชื่อมขอบจำนวน 12 ถึง 20 ชุด เพื่อเสริมความแข็งแรงในการใช้งาน โลหะที่ใช้สร้างอาจเป็นเหล็กเกรดมาตรฐาน หรือเหล็กไร้สนิม ส่วนการป้อนไอน้ำ โดยปกติจะมีหัวฉีดไอน้ำอยู่ด้านบนและด้านข้างในเปลือกทรงกระบอก ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบจะถูกป้อนผ่านรถเข็นเข้าออกด้วยราง ระยะเวลาในการอบตามกระบวนการอาจช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ อุปกรณ์ประกอบของภาชนะรับแรงดันไอน้ำที่สำคัญๆจะประกอบด้วย ชุดลิ้นลดความดันไอน้ำจากหม้อไอน้ำ เกจวัดความดันไอน้ำ เทอร์โมมิเตอร์ ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ และลิ้นนิรภัยเพื่อระบายไอน้ำกรณีฉุกเฉิน ส่วนล่างของภาชนะจะมีท่อระบายน้ำซึ่งเกิดการควบแน่นทั้งออกไป



รูปที่ 1.7 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำใช้อบฆ่าเชื้อ

1.4.5 ระบบท่อน้ำ

ระบบท่อน้ำจะกล่าวครอบคลุมท่อจ่ายไอน้ำ ซึ่งต่อจากถังพักไอน้ำไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ โดยจะประกอบด้วยท่อประธาน ท่อแยก ข้อต่อ และวาล์วไอน้ำ ดังรูปที่ 1.8 ระบบท่อน้ำที่แยกจากท่อประธานเพื่อส่งเข้าอุปกรณ์การใช้ไอน้ำต่างๆ จะถูกออกแบบให้มีอุปกรณ์แยกเอาน้ำควบแน่นออกจากไอน้ำ ดังแสดงใน รูปที่ 1.9 เป็นถังพักไอน้ำก่อนการหุ้มฉนวนกันความร้อนส่วนด้านล่างจะต้องติดตั้งอุปกรณ์แยกน้ำควบแน่น หรือกับดักไอน้ำไว้เสมอ



รูปที่ 1.8 ระบบท่อน้ำที่จ่ายเข้าหม้ออบฆ่าเชื้อ

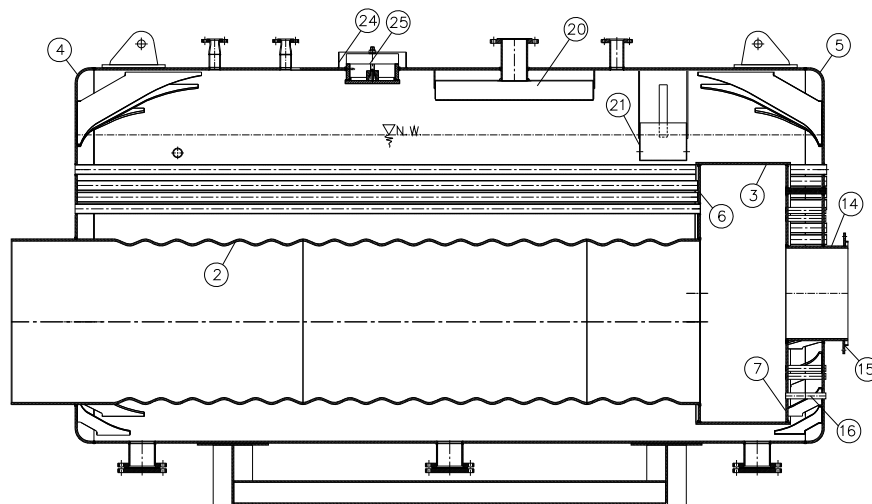
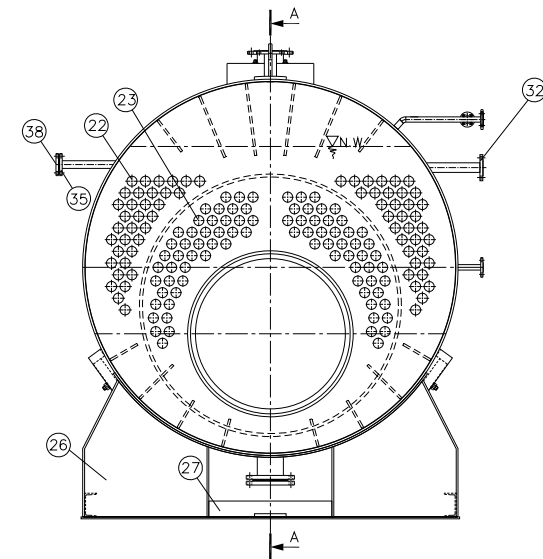
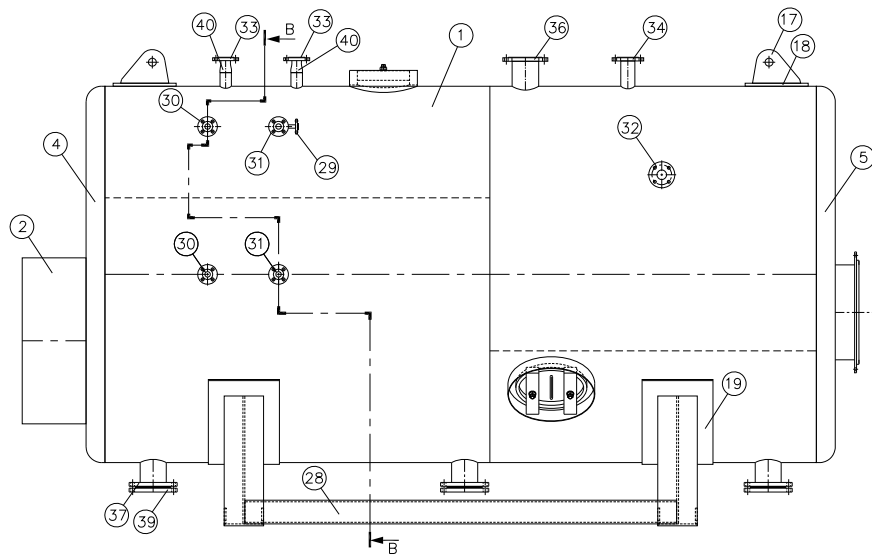


รูปที่ 1.9 ถังพักไอน้ำก่อนการหุ้มฉนวนและกับดักไอน้ำ

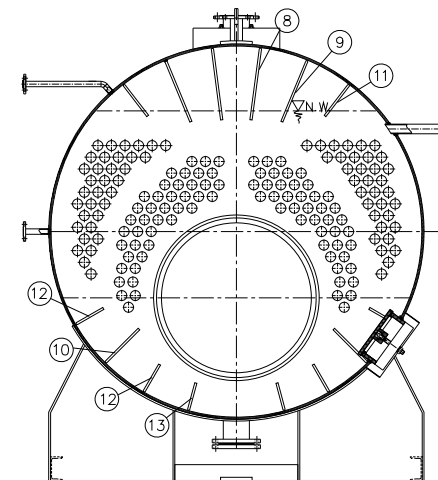
1.5 รายละเอียดโครงสร้างหม้อไอน้ำ

รายละเอียดหม้อไอน้ำสำหรับในหัวข้อนี้ จะนำเสนอเฉพาะแบบท่อไฟ หรือหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม ซึ่งโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆออกแบบตามมาตรฐาน โดยโครงสร้างจะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย สามารถรับความเค้นในแนวต่างๆซึ่งเกิดจากความดัน และอุณหภูมิขณะทำงานปกติ ได้ รูปที่ 1.10 แสดงรายละเอียดโครงสร้างของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ชนิด 3 กลีบ และรายการส่วนประกอบดัง ตารางที่

1.1



Section A-A



Section B-B

รูปที่ 1.10 รายละเอียดโครงสร้างของหม้อไอน้ำแบบหล่อไฟ ชนิด 3 กลั

ตารางที่ 1.1 แสดงรายละเอียดหมายเลขของโครงสร้างของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ชนิด 3 กลับ

1	เปลือก (ถัง) (Shell)	8-13	หูช้าง (เหล็กยึดโยง) (Gusset Stay)	21	กล่องน้ำเข้า (Water Box)	28	เหล็กฐาน (Channel)	35	หน้าแปลนช่องระบายผิว (Plate Flange (Surface Blow down))
2	ท่อไฟใหญ่ (เตา) (Furnace)	14	แผ่นครอบ (Cover Plate)	22	ท่อไฟเล็กกลับที่ 3 (Smoke Tube 3 rd)	29	ลิ้นตรวจระดับน้ำ (Level Gouge Valve)	36	หน้าแปลนท่อประธาน (Plate Flange (Main Steam))
3	ห้องไฟกลับ (Reverse Box)	15	หน้าแปลนท้าย (End Cover)	23	ท่อไฟเล็กกลับที่ 2 (Smoke Tube 2 nd)	30	หน้าแปลนยึดแท่งแก้วดูระดับน้ำ (Plate Flange (Level Glass))	37	หน้าแปลนช่องคนลง (Plate Flange (Man Hole))
4	แผ่นหน้า (Front Plate)	16	แท่งยึดโยง (Stay Rod)	24	แผ่นยึดช่องคนลง (Plate Flange (Man Hole))	31	หน้าแปลนยึดชุดลูกกลอยระดับน้ำ (Plate Flange (Level Control))	38	แผ่นปิดช่องท่อระบาย (Plate Flange (Blow down))
5	แผ่นหลัง (Back Plate)	17	หูหิ้ว (Lifting)	25	ช่องคนลง (Man Hole)	32	หน้าแปลนท่อน้ำเข้า (Plate Flange (Water Inlet))	39	แผ่นปิดช่องมือถอด (Plate Flange (Hand Hole))
6	แผ่นหน้าห้องไฟกลับ (Front Reverse Plate)	18-19	แผ่นเชื่อมยึด (Saddle)	26	แท่นเครื่อง (Stand)	33	หน้าแปลนยึดลิ้นนิรภัย (Plate Flange (Safety Valve))	40	ท่อลด (Reducing Tube)
7	แผ่นหลังห้องไฟกลับ (Rear Reverse Plate)	20	กล่องแยกไอน้ำ (Main Steam Box)	27	เหล็กยึดฐาน (Plate)	34	หน้าแปลนยึดอิเล็กโทรด (Plate Flange (Electrode Control))		

1.6 เอกสารอ้างอิงและกิตติกรรมประกาศ

ในการจัดร่างมาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพพระบหม้อไอน้ำนี้ได้อ้างอิงข้อมูลหลักจากมาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพสากล มาตรฐานและข้อกำหนดภายในประเทศและได้อาศัยข้อมูลทางวิชาการ จาก ตำรา คู่มือการปฏิบัติงานรวมถึงรูปภาพประกอบการอธิบายเพื่อความสมบูรณ์ตามกรอบงาน ทั้งนี้คณะทำงานยกร่างได้รับความอนุเคราะห์จากหลายหน่วยงาน รวมทั้งการจัดรูปถ่าย และข้อมูลจำเพาะบางอย่างอันเป็นประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติงานในระบบไอน้ำ ในการนี้ คณะทำงานใคร่ขอขอบคุณหน่วยงานราชการรัฐวิสาหกิจและบริษัทฯ ดังนี้

- 1.6.1 สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- 1.6.2 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- 1.6.3 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- 1.6.4 บริษัท ไทยเบฟเวอเรจ จำกัด (มหาชน)
- 1.6.5 บริษัท บุญเยี่ยมและสหฯ จำกัด
- 1.6.6 บริษัท ไทย เค บอยเลอร์ จำกัด
- 1.6.7 บริษัท สดาร์ปีโตรเลียม รีไฟน์นิ่ง จำกัด
- 1.6.8 Spirax – Sarco (Thailand) Co., Ltd

หน่วยที่ 2 หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตไอน้ำ ซึ่งมีหลายประเภทตามการออกแบบ เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าและอุตสาหกรรมบริการ โครงสร้างของหม้อไอน้ำจะต้องมีความแข็งแรงทนทานสูง ทั้งนี้เพื่อเป็นส่วนที่รองรับน้ำหนักน้ำที่บรรจุอยู่ภายในและความดันไอน้ำที่ผลิตขึ้นได้อย่างปลอดภัย นอกจากโครงสร้างแล้วหม้อไอน้ำยังประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐานอื่นๆอีก ได้แก่ ระบบการควบคุมระดับน้ำ ระบบระบายน้ำทิ้งเพื่อลดความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในน้ำ ระบบควบคุมความดันไอน้ำ ระบบควบคุมการเผาไหม้ซึ่งรวมเอาชุดควบคุมการป้อนปริมาณอากาศและชุดควบคุมการป้อนปริมาณเชื้อเพลิงเข้าไว้ในระบบเดียวกัน และระบบวงจรไฟฟ้าควบคุมการทำงานรวม นอกจากระบบต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว ยังมีระบบควบคุมอัตโนมัติอาจจำเป็นต้องมีใช้เพื่อลดภาระของผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ ตลอดจนเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดของคน และระบบการแจ้งเตือนต่างๆ เพื่อให้ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำรู้ถึงสถานะการทำงานที่เป็นปกติหรือผิดปกติซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องมีไว้เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือไปสู่วิธีการนำไปใช้งานได้อย่าง ในหน่วยนี้จะกล่าวถึงกรอบนิยาม ประเภท ขนาด และความสามารถของหม้อไอน้ำแบบที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกใช้งานต่อไป

2.1 วัตถุประสงค์

- เพื่อให้รู้ถึงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของหม้อไอน้ำ ชนิดและหลักการทำงานเพิ่มเติม ปัจจัยพื้นฐานในการออกแบบระบบและอุปกรณ์ประกอบหน้าที่ การทำงาน แนะนำลำดับขั้นตอนการสร้าง และการควบคุมการประกอบและลำดับขั้นตอนการปรับแต่งการทำงานของระบบหม้อไอน้ำ

2.2 ขอบเขตและนิยาม

2.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire-tube Steam Boiler) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water-tube Steam Boiler) และหม้อไอน้ำแบบผสม (Combination Steam Boiler) ที่ใช้เชื้อเพลิงแข็ง ประเภท ถ่านหิน กับประเภทชีวมวล เช่น ไม้ แกลบ กะลาปาล์ม เชื้อเพลิงเหลวประเภทน้ำมันเตา น้ำมันดีเซล และเชื้อเพลิงก๊าซ เช่น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ เป็นบรรทัดฐานในการพิจารณานำเสนอ

2.2.2 นิยาม

- 2.2.2.1 หม้อไอน้ำ หมายถึง ภาชนะปิดสำหรับบรรจุน้ำที่มีปริมาตรความจุเกิน 2.0 ลิตร ขึ้นไป เมื่อได้รับความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิง หรือจากแหล่งพลังงานความร้อนอื่นๆ น้ำที่บรรจุอยู่ภายในจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ ภายใต้ความดันมากกว่า 1.5 เท่าของความดันบรรยากาศที่ความสูงระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยที่ภาชนะปิดนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถรับความดันไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในได้ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์ควบคุมเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน
- 2.2.2.2 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หมายถึง หม้อไอน้ำที่มีโครงสร้างทางกายภาพแบบเปลือกและท่อ น้ำบรรจุไว้ในเปลือก ก๊าซร้อนไหลภายในท่อที่สอดเข้าไปในเปลือก ดังนั้นน้ำจะอยู่ล้อมรอบผิวท่อภายนอก พลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่ไหลภายในท่อจะถูกถ่ายเทออกสู่ผิวภายนอกให้กับน้ำ แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ

- 2.2.2.3 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ หมายถึง หม้อไอน้ำที่มีโครงสร้างทางกายภาพแบบท่อน้ำไหลเวียน น้ำบรรจุภายในท่อ ก๊าซร้อนไหลภายนอกท่อ พลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่ไหลผ่านผิวภายนอกท่อจะถูกถ่ายเทเข้าสู่ภายในให้กับน้ำ แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ
- 2.2.2.4 หม้อไอน้ำแบบผสม หมายถึง หม้อไอน้ำที่มีโครงสร้างทางกายภาพเป็นลักษณะผสมทั้งแบบท่อไฟและแบบท่อน้ำรวมกัน
- 2.2.2.5 ขนาคของหม้อไอน้ำ (Boiler Capacity) หมายถึง ความสามารถในการกำเนิดไอน้ำในรูปแบบของพลังงานความร้อน ต่อ หน่วยเวลา

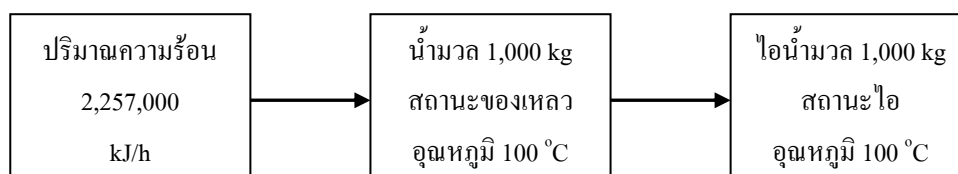
	kW	kilo Watt	กิโลวัตต์
หรือ	kJ/s	kilo Joule/second	กิโลจูล ต่อ วินาที

- 2.2.2.6 อัตราการกำเนิดไอน้ำ (Evaporation Rate) หมายถึง อัตราการเปลี่ยนสถานะของน้ำในหม้อไอน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ ในรูปแบบของมวลไอน้ำ ต่อ หน่วยเวลา ที่ความดันไอน้ำเท่ากับความดันบรรยากาศ ณ ระดับน้ำทะเลปานกลาง

หน่วยของอัตราการกำเนิดไอน้ำ	ตันไอน้ำ ต่อ ชั่วโมง
มาจาก	ton of steam per hour From & At 100 °C
หรือย่อเป็น	ton/h F&A 100 °C

- 2.2.2.7 หนึ่งตันหม้อไอน้ำ หมายถึง อัตราการกำเนิดไอน้ำ เท่ากับ 1 ตันไอน้ำต่อชั่วโมง หรือ อัตราการเปลี่ยนสถานะของน้ำในหม้อไอน้ำให้กลายเป็นไอน้ำจากน้ำอุณหภูมิ 100 °C มวล 1,000 kg ให้เดือดกลายเป็นไอน้ำหมดที่อุณหภูมิ 100 °C ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ความกดดันบรรยากาศปกติ โดยน้ำได้รับพลังงานความร้อน 2,257,000 kJ เพื่อใช้เป็นความร้อนแฝง ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า

1 ตันไอน้ำ ต่อ ชั่วโมง	เทียบเท่า	2,257,000 kJ/h
	เทียบเท่า	626.94 kJ/s
	เทียบเท่า	626.94 kW



- 2.2.2.8 แรงม้าหม้อไอน้ำ(Boiler Horse Power, BHP) หมายถึง หน่วยวัดอัตราการกำเนิดไอน้ำในอีกรูปแบบหนึ่ง โดยที่หม้อไอน้ำขนาด 1 ton/h จะเทียบเท่า 63.898 BHP

1 ton/h	เทียบเท่า	63.898 BHP
1 BHP	เทียบเท่า	15.65 kg/h

- 2.2.2.9 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer) คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการส่งถ่ายพลังงานความร้อนจากการสั่นของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมหนึ่งภายในของตัวกลางนั้นๆ หรือเรียกว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุตัวกลาง โดยที่แหล่งพลังงานความร้อนสัมผัสโดยตรงกับผิวของตัวกลาง ซึ่งตัวกลางที่ถ่ายเทความร้อนแบบนี้เกือบทั้งหมดจะมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นโลหะเหลว เช่นปรอท เป็นคั่น โลหะจะนำความร้อนได้ดีกว่า
- 2.2.2.10 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection Heat Transfer) คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการส่งถ่ายพลังงานความร้อน ระหว่างผิวของวัตถุที่เป็นของแข็งสัมผัสกับของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ โดยของไหลมีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซ
- 2.2.2.11 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer) คือ การถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง พลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่ในรูปของแม่เหล็กไฟฟ้า จำนวนพลังงานที่ส่งถ่ายออกโดยการแผ่รังสีจากผิววัตถุในรูปของรังสีความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อนกัน
- 2.2.2.12 ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) คือ พลังงานความร้อนที่ถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ถึงจุดเดือด
- 2.2.2.13 ความร้อนแฝง (Latent heat) คือ พลังงานความร้อนที่ถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอ ในขณะที่อุณหภูมิและความดันคงที่
- 2.2.2.14 ก๊าซสันดาป คือ ก๊าซร้อนที่ได้จากการสันดาประหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ การไหลของก๊าซร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการพา
- 2.2.2.15 อัตราส่วนการไหลเวียน (Circulation ratio, CR) คือ จำนวนรอบของมวลน้ำทั้งหมดที่ไหลเวียนจนมวลน้ำนั้นกลายเป็นไอน้ำทั้งหมด เช่น อัตราการไหลเวียน เท่ากับ 10 หมายถึง น้ำมวล 1,000 kg ไหลเวียนภายในตัวหม้อไอน้ำทั้งหมด 10 รอบ จนน้ำกลายเป็นไอน้ำมวล 1,000 kg ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าทุกๆรอบการไหลเวียนของน้ำจะได้ไอน้ำ 100 kg
- 2.2.2.16 ห้องเผาไหม้ (Furnace) คือ ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำที่ใช้สำหรับสันดาปเชื้อเพลิงกับอากาศ ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนให้กับหม้อไอน้ำ
- 2.2.2.17 หม้อเก็บกักไอ (Steam drum) คือ ภาชนะรับความดันที่ใช้เก็บกักไอน้ำที่ผลิตขึ้นจากหม้อไอน้ำ รวมทั้งกักเก็บน้ำที่ใช้ในการต้มให้เดือดกลายเป็นไอ โดยทั้งไอน้ำและน้ำจะถูกเก็บไว้ในภาชนะเดียวกัน ส่วนที่เป็นไอน้ำจะอยู่เหนือผิวน้ำภายใต้ความกดดันเดียวกัน
- 2.2.2.18 อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) คือ ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำที่ใช้ต้มน้ำจากสถานะของเหลวให้เปลี่ยนไปเป็นไอน้ำอิ่มตัว โดยได้รับความร้อนจากระบบการสันดาป อุปกรณ์นี้ใช้กับหม้อไอน้ำทุกชนิด
- 2.2.2.19 ซุปเปอร์ฮีเตอร์ (Super heater) คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนไอน้ำอิ่มตัวให้กลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด โดยได้รับความร้อนจากระบบการสันดาป อุปกรณ์นี้ใช้กับหม้อไอน้ำแบบไอน้ำยิ่งยวดเท่านั้น

- 2.2.2.20 อีโคโนไมเซอร์ (Economizer) คือ อุปกรณ์ที่ใช้อุ่นน้ำป้อน โดยเพิ่มอุณหภูมิ น้ำป้อนที่ไหลก่อนเข้า หม้อเก็บกักไอน้ำ ด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากไอเสีย อุปกรณ์นี้ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำพร้อมทั้งลดอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ
- 2.2.2.21 แอร์พรีฮีตเตอร์ (Air pre-heater) คือ อุปกรณ์ที่ใช้อุ่นอากาศ โดยเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่ไหลก่อนเข้าทำการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง ด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากไอเสีย อุปกรณ์นี้ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำพร้อมทั้งลดอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ หม้อไอน้ำบางชนิดอาจจะไม่ได้ใช้

2.3 ส่วนประกอบหลักของหม้อไอน้ำ

การใช้งานหม้อไอน้ำนั้นมีประวัติศาสตร์บันทึกไว้มานานนับตั้งแต่ 130 ปีก่อนคริสตกาล คือหม้อไอน้ำของโรมัน นักคณิตศาสตร์ชาวอียิปต์ แต่ไม่ได้นำมาใช้กันแพร่หลาย จนกระทั่งถึงยุคพัฒนาอุตสาหกรรม ได้มีความพยายามสร้างหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจนประสบความสำเร็จเมื่อปี ค.ศ. 1765 โดย เจมส์ วัตต์ ดังนั้นเขาจึงได้ชื่อว่าเป็นบิดาแห่งเครื่องจักรไอน้ำ ทั้งนี้และทั้งนั้นส่วนประกอบหลักของหม้อไอน้ำที่มีมาตั้งแต่ยุคเริ่มแรก ต่อเนื่องมาจนถึงยุคปัจจุบันก็ยังคงแบ่งได้ 2 ส่วน คือ

- ระบบการสันดาป (combustion System)
- ระบบน้ำและไอน้ำ (Water-Steam System)

2.3.1 ระบบการสันดาป

มีส่วนประกอบหลักคือ ห้องเผาไหม้ หรือ เตาเผา ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้กำเนิดพลังงานความร้อนขึ้นจากการสันดาประหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในปริมาณที่เหมาะสม พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปให้ระบบน้ำและไอน้ำต่อไป หากหม้อไอน้ำเป็นแบบชนิดที่รับเอาพลังงานความร้อนมาจากภายนอก เช่น หม้อไอน้ำแบบรับความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat boiler) โดยปกติจะไม่มีระบบการสันดาปอยู่ภายในตัว ซึ่งถ้าหากจะมีก็เพื่อใช้เติมพลังงานความร้อนเพิ่มเข้าไปหากพลังงานความร้อนที่ได้รับมาจากภายนอกไม่เพียงพอ โดยทั่วไประบบการสันดาปของหม้อไอน้ำจะแบ่งตามสถานะของเชื้อเพลิง ได้แก่

- เชื้อเพลิงก๊าซ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือก๊าซแอลพีจี ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น
- เชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล เป็นต้น
- เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน แกลบ กะลาปาล์ม ไม้ เป็นต้น

เชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว จะใช้เครื่องฟืนไฟ (Burner) เป็นอุปกรณ์สันดาปเชื้อเพลิงกับอากาศเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนให้กับหม้อไอน้ำ เชื้อเพลิงแข็งบางชนิด เช่น ผงถ่านหินละเอียด ก็สามารถใช้ในเครื่องฟืนไฟชนิดพิเศษที่ออกแบบมาเฉพาะใช้ในหม้อไอน้ำแบบฟัลเวอร์ไรซ์ ส่วนเชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่จะใช้ตะกรับเตา (Stoker) เป็นอุปกรณ์สันดาปเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งก็คือเป็นการนำเอาเชื้อเพลิงแข็งที่มีลักษณะเป็นก้อนหรือชิ้นเล็กๆ มาเผาบนตะกรับเตาให้เกิดการลุกไหม้ขึ้นเอง ตะกรับเตามีหลายแบบ เช่น ตะกรับเตาแบบโปรยลง (Spreader stoker) ตะกรับเตาแบบป้อนล่าง (Underfeed stoker) ตะกรับเตาแบบสั่น (Vibrating grate stoker) ตะกรับแบบเคลื่อนที่ (Traveling grate stoker) เป็นต้น นอกจากนี้เชื้อเพลิงแข็งยังสามารถสันดาปโดยวิธีอื่นๆ ได้อีก เช่น แบบฟลูอิดไคซ์เบด และแบบไซโคลน เป็นต้น ซึ่งไม่ได้นำมากล่าวไว้ในที่นี้

2.3.2 ระบบน้ำและไอน้ำ

มีโครงสร้างเป็นภาชนะรับแรงดัน ภายในโครงสร้างนี้สามารถบรรจุน้ำและไอน้ำที่มีความดันสูงกว่าบรรยากาศได้ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์ป้อนน้ำเข้าระบบ อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำและอุปกรณ์ความดันไอน้ำให้อยู่ในสถานะการใช้งานปกติ น้ำที่บรรจุไว้ภายในระบบจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำเมื่อดูดซับเอาพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากระบบการสันดาป พลังงานความร้อนดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ถึงจุดเดือดและใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นสถานะไอ เรียกว่า ไอน้ำ โดยไอน้ำที่ได้ในขั้นต้นนั้นคือไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งจะถูกรวบรวมไว้ในหม้อกักเก็บไอน้ำ โดยทั่วไปแล้วไอน้ำอิ่มตัวสามารถนำไปใช้งานได้ แต่หากต้องการไอน้ำที่แห้งมากขึ้นและมีพลังงานความร้อนสูงที่ขึ้นมากกว่าไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันเท่ากัน ซึ่งสามารถทำได้จากการปล่อยให้ไอน้ำอิ่มตัวไหลออกจากหม้อกักเก็บไอน้ำผ่านเข้าอุปกรณ์ที่เรียกว่าซูเปอร์ฮีเตอร์ เพื่อไปดูดซับเอาพลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาปเพิ่มขึ้นอีก ผลที่ได้ก็คือไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด ซึ่งไอน้ำทั้งสองแบบนี้ก็คือผลผลิตที่ได้จากการทำงานของหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำที่ใช้กันในอุตสาหกรรมทั่วไปจะให้เป็นแบบไอน้ำอิ่มตัว ส่วนหม้อไอน้ำที่ผลิตไอน้ำยิ่งยวดนั้นจะใช้ในวัตถุประสงค์เฉพาะทางที่ต้องการความแห้งของไอน้ำและมีพลังงานความร้อนไอน้ำสูง เช่น การนำไอน้ำไปใช้ขับเคลื่อนไอน้ำเป็นต้น

2.4 ประเภทของหม้อไอน้ำ

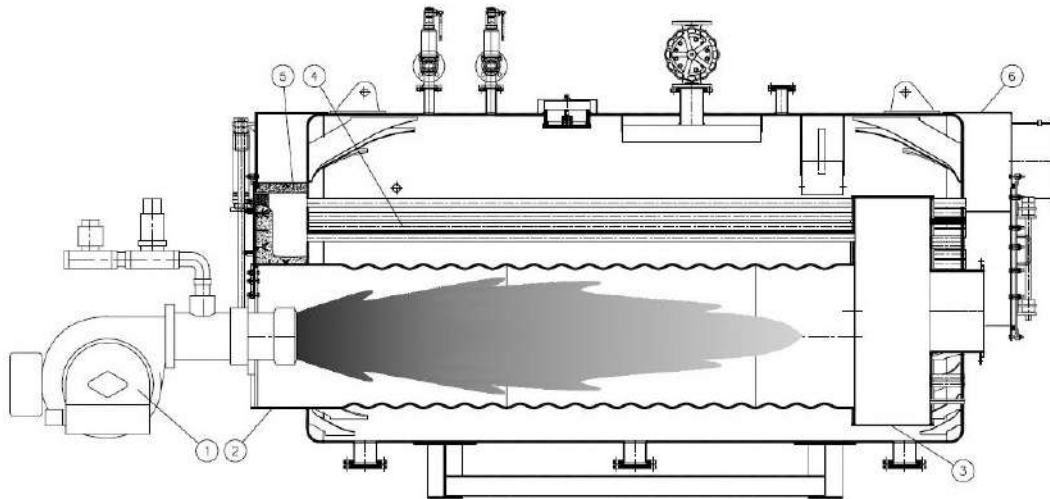
การแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำจะถูกกำหนดตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิงเป็นหลักโดยปกติแล้ว จะแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำและหม้อไอน้ำแบบผสม ดังรายละเอียด

2.4.1 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

เป็นหม้อไอน้ำที่แบ่งแยกส่วนการไหลของก๊าซร้อนอยู่ภายในท่อไฟ ส่วนน้ำจะอยู่ล้อมรอบท่อภายนอก โดยท่อไฟทั้งหมดจะอยู่ภายในเปลือก และเปลือกนั้นจะมีหน้าที่เป็นภาชนะใส่น้ำทั้งหมดรวมถึงเป็นภาชนะรับความดันไอน้ำด้วย การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากก๊าซร้อนถ่ายเทให้ผิวท่อด้านในแล้วส่งผ่านไปยังผิวท่อด้านนอกทำให้น้ำที่อยู่ล้อมรอบท่อไฟได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณหนึ่งที่เหมาะสมที่จะทำให้ น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ โดยจุดเดือดของน้ำนั้นจะแปรผันตามความดันของน้ำในขณะนั้นด้วย



รูปที่ 2.1 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

จากรูปที่ 2.2 เครื่องพ่นไฟ หมายเลข 1 เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนซึ่งอาจได้จากการสันดาปของเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันหรือก๊าซ เกิดเป็นเปลวไฟพุ่งเข้าไปยังท่อไฟใหญ่ หมายเลข 2 โดยที่ต้นเปลวไฟอยู่ที่เครื่องพ่นไฟและส่วนปลายเปลวไฟจะอยู่ไม่เกินความยาวของท่อไฟใหญ่ การสันดาปโดยสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงกับอากาศจะเกิดขึ้นภายในท่อไฟใหญ่นี้ หลังจากนั้นก๊าซร้อนที่ได้จากการสันดาปจะไหลออกพ้นท่อไฟใหญ่ไปด้านหลังแล้วไหลวกกลับที่บริเวณ ห้องเปลี่ยนทิศทาง (Reverse chamber) หมายเลข 3 ก๊าซร้อนจะไหลขึ้นบนเล็กน้อยและวกเข้าไปยังชุดท่อไฟเล็ก หมายเลข 4 ที่เรียงรายอยู่เป็นกลุ่มเหนือท่อไฟใหญ่ จากนั้นก๊าซร้อนจะไหลย้อนกลับทิศทางมายังด้านหน้า แล้วไหลเปลี่ยนทิศทางไปด้านตรงข้ามอีกครั้งที่ กล่องควันหน้า (Front smoke box) หมายเลข 5 โดยก๊าซร้อนนี้จะไหลวกกลับไปเข้ากลุ่มท่อไฟเล็กอีกกลุ่มหนึ่งแล้วไหลออกนอกตัวหม้อไอน้ำที่ กล่องควันหลัง (Rear smoke box) หมายเลข 6 โดยทั่วไปก๊าซร้อนที่ไหลภายในท่อไฟนี้จะถูกเรียกว่า ก๊าซสันดาปเมื่อไหลผ่านพื้นตัวหม้อไอน้ำไปออกปล่องควันแล้วจะถูกเรียกว่า ไอเสีย การไหลวกกลับกลับมาของก๊าซสันดาปนี้จะสามารถนำไปแบ่งแยกชนิดของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟได้ ตามจำนวนครั้งของการไหลของก๊าซสันดาป อย่างเช่นดังตัวอย่างที่อธิบายมาด้านบนนี้เป็นหม้อไอน้ำแบบท่อไฟชนิด 3 กลับ เพราะมีการไหลเปลี่ยนทิศทางอยู่ 3 ครั้งด้วยกัน ในปัจจุบันส่วนใหญ่แล้ว จำนวนกลับของหม้อไอน้ำแบบนี้จะมีตั้งแต่ 2 ถึง 4 กลับ ขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิต แต่หม้อไอน้ำชนิด 3 กลับ ได้รับความนิยมมากที่สุด

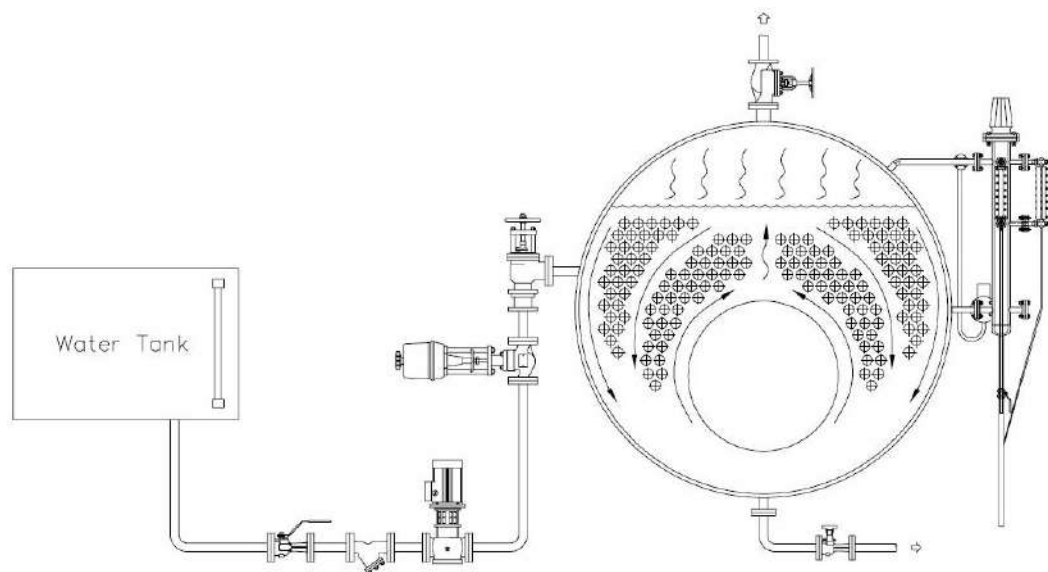
จากการไหลของก๊าซสันดาปตั้งแต่กลับแรกที่ท่อไฟใหญ่ แล้วไหลผ่านกลุ่มท่อไฟเล็กต่างๆ จนกระทั่งไหลออกนอกตัวหม้อไอน้ำนั้น พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสันดาปจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ใส่ไว้ในเปลือกหม้อไอน้ำ ผ่านทางผนังของท่อไฟต่างๆ เมื่อน้ำได้ดูดซับเอาพลังงานความร้อนเข้าไป พลังงานความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ถึงจุดเดือด อีกส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ

การถ่ายเทพลังงานความร้อนตั้งแต่เริ่มต้นในท่อไฟใหญ่นั้น จะมีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นจากเปลวไฟ รวมกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นจากการไหลของก๊าซสันดาปไปสัมผัสผิวของท่อไฟใหญ่ เมื่อผิวของท่อไฟใหญ่ซึ่งทำจากโลหะได้รับพลังงานจากการถ่ายเทความร้อนจากทั้งสองแบบดังกล่าวแล้ว จะทำให้ผิวมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำเกิดขึ้นภายในผิวโลหะนี้ส่งไปยังผิวอีกด้าน

หนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งถูกล้อมรอบด้วยน้ำ ผิวอีกด้านหนึ่งของท่อไฟใหญ่ก็จะถ่ายเทความร้อนไปให้น้ำโดยการพา ส่วนในด้านของท่อไฟเล็กจะมีการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างจากท่อไฟใหญ่อยู่อย่างเดียวคือ มีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งในที่นี้เราจะไม่นำมาคำนวณในขั้นตอนการออกแบบ ดังนั้นจึงเหลือเฉพาะการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการนำ

ดังนั้นการออกแบบการถ่ายเทความร้อนของท่อไฟใหญ่ เราจะเรียกว่า เขตแผ่รังสีความร้อน (Radiation Zone) และกลุ่มท่อไฟเล็ก เราจะเรียกว่า เขตพาความร้อน (Convection Zone) ตามความร้อนส่วนใหญ่ที่มีการถ่ายเทเกิดขึ้นในเขตนั้นๆ

ในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟส่วนใหญ่ออกแบบให้ผลิตไอน้ำแบบไออิ่มตัว แต่ก็มีกรออกแบบให้ผลิตไอน้ำยิ่งยวดได้ด้วย โดยเพิ่มชุดซูเปอร์ฮีเตอร์เข้าไปที่บริเวณกลองคว้นหน้า หมายเลข 5



รูปที่ 2.3 วงจรการไหลเวียนของน้ำภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

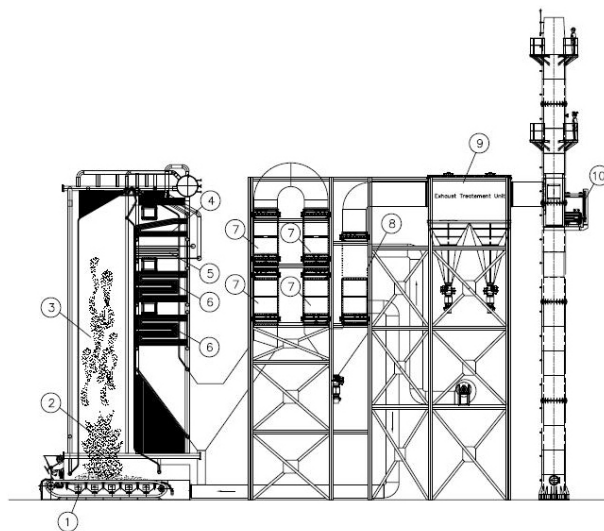
การไหลเวียนของน้ำภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ สามารถอธิบายได้จากจากรูปที่ 2.3 น้ำถูกดูดมาจากถังเก็บน้ำโดยปั๊มน้ำผ่านวาล์วกันกลับเข้าไปยังเปลือกของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ น้ำจะถูกกักเก็บไว้และรักษาระดับน้ำไว้ให้คงที่โดยอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ (Water level controller) เมื่อเกิดการสันดาปจากเครื่องฟืนไฟ พลังงานความร้อนจะถ่ายเทไปที่ผนังท่อไฟใหญ่และท่อไฟเล็ก ทำให้น้ำที่อยู่ภายนอกท่อไฟมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการเดือด โดยธรรมชาติของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและเดือดจะเกิดการไหลขึ้นด้านบน ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ ดังนั้นจึงเกิดวงจรไหลเวียนของน้ำภายในเปลือกของหม้อไอน้ำ โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลขึ้นมาด้านบนใกล้กับระดับผิวน้ำ ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลลงด้านล่างแนบผิวผนังของเปลือกลงไป น้ำที่ได้รับพลังงานความร้อนจนเดือดนี้จะเกิดการไหลเวียนของน้ำผสมกับไอน้ำ เมื่อไหลเวียนขึ้นถึงผิวระดับน้ำด้านบน ไอน้ำจะลอยขึ้นเหนือผิวน้ำส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะรวมเข้ากับน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ป้อนเข้ามาใหม่ ไหลเวียนลงด้านล่างเป็นวงจรแบบนี้ต่อไปเรื่อยๆ เรียกว่า วงจรการไหลเวียนของน้ำภายในหม้อไอน้ำ อัตราส่วนการไหลเวียนของน้ำในหม้อไอน้ำต่อไอน้ำแบบท่อไฟประมาณ 15-50 ต่อ 1

2.4.2 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

เป็นหม้อไอน้ำที่แบ่งแยกส่วนการไหลของก๊าซร้อนอยู่ภายนอกท่อ ส่วนน้ำจะอยู่ภายในท่อ หม้อกักเก็บไอน้ำจะมีหน้าที่เป็นภาชนะใส่น้ำทั้งหมดรวมถึงเป็นภาชนะรับความดันไอน้ำด้วย การถ่ายเทพลังงานความร้อนจะเกิดจากผิวท่อด้านนอก แล้วส่งผ่านไปยังผิวท่อด้านในทำให้น้ำที่อยู่ภายในท่อได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณหนึ่งที่มากพอที่จะทำให้ น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ โดยจุดเดือดของน้ำนั้นจะแปรผันตามความดันของน้ำในขณะนั้นด้วย



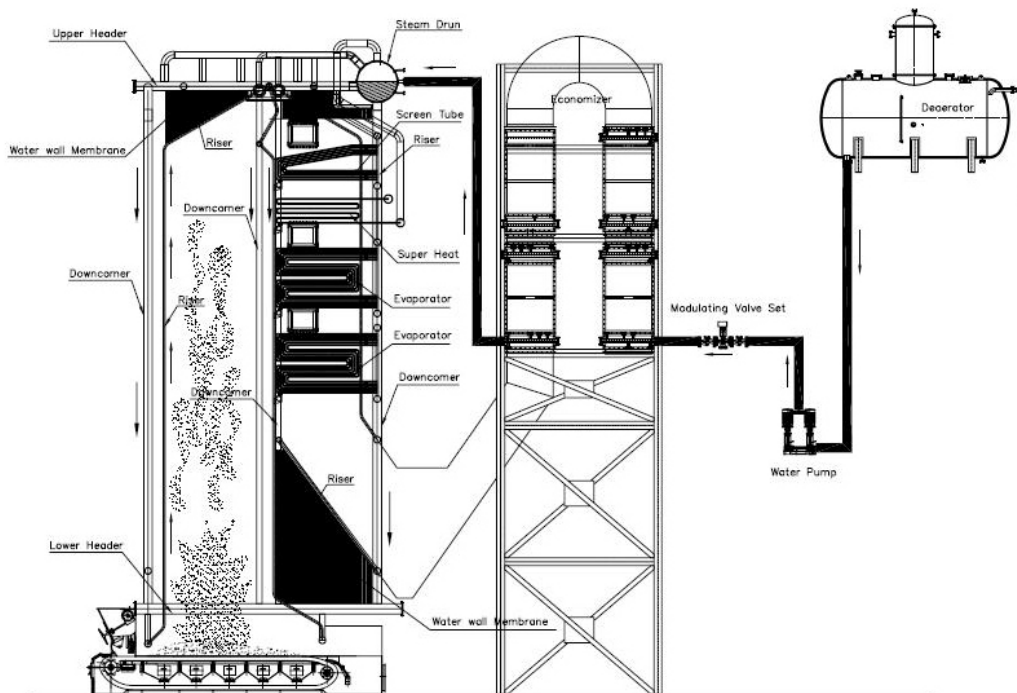
รูปที่ 2.4 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

จากระดับที่ 2.5 ตะกรับเตา หมายเลข 1 เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนซึ่งได้จากการสันดาปของเชื้อเพลิง
 แข็งกับอากาศจากพัดลมเป่า หมายเลข 2 เกิดเป็นเปลวไฟลุกไหม้ ก๊าซร้อนลอยขึ้นด้านบนของห้องเผาไหม้
 หมายเลข 3 การสันดาปโดยสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงกับอากาศจะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ หลังจากนั้นก็ก๊าซ
 สันดาปจะไหลออกพ้นห้องเผาไหม้ ไปผ่านชุดท่อตะแกรง (Screen tube) หมายเลข 4 และไหลต่อไปยังชุด
 ชุดเปอร์ฮีเตอร์ หมายเลข 5 และ ชุดอีแวปโปเรเตอร์ หมายเลข 6 ตามลำดับ ต่อจากนั้นก็ก๊าซสันดาปจะไหลเข้า
 ไปผ่านชุดอีโคโนไมเซอร์ หมายเลข 7 และ แอร์พรีฮีเตอร์ หมายเลข 8 หลังจากนั้นก๊าซร้อนนี้จะเรียกว่าไอเสีย
 เพราะจะไม่มีมีการถ่ายเทความร้อนเกิดเข้าสู่ระบบอีก โดยไอเสียจะไหลเข้าไปบำบัดในอุปกรณ์บำบัดไอเสีย
 (Exhaust treatment unit) หมายเลข 9 ไหลต่อไปยังพัดลมดูด หมายเลข 10 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสร้างและกำหนด
 อัตราการไหลของก๊าซร้อนและไอเสีย หลังจากนั้นไอเสียจะถูกปล่อยออกนอกกระบบสู่บรรยากาศภายนอก จาก
 การไหลของก๊าซสันดาปตั้งแต่ในห้องเผาไหม้ ผ่านไปยัง ชุดท่อตะแกรง ชุดชุดเปอร์ฮีเตอร์ ชุดอีแวปโปเร
 เตอร์ จนกระทั่งถึง ชุดอีโคโนไมเซอร์ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาปเข้าสู่ระบบน้ำ
 และไอน้ำ ส่วนแอร์พรีฮีเตอร์ ซึ่งเป็นชุดสุดท้ายของการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบ อากาศที่ใช้
 สันดาปจะได้รับการอุ่นให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่
 สมบูรณ์ การถ่ายเทพลังงานความร้อนตั้งแต่เริ่มต้นในห้องเผาไหม้นั้น จะมีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี
 เกิดขึ้นจากเปลวไฟ รวมกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นจากการไหลของก๊าซสันดาปไปสัมผัสผิวของ
 ท่อน้ำและครีบทที่ทำเป็นผนังของห้องเผาไหม้ (Water wall membrane) เมื่อผิวของท่อน้ำซึ่งทำจากโลหะได้รับ
 พลังงานจากการถ่ายเทความร้อนจากทั้งสองแบบดังกล่าวแล้ว จะทำให้ผิวมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วมีการถ่ายเท
 ความร้อนโดยการนำเกิดขึ้นภายในผิวโลหะนี้ส่งไปยังผิวอีกด้านหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งมีน้ำอยู่ภายใน ผิวอีก
 ด้านหนึ่งของท่อน้ำจะถ่ายเทความร้อนไปให้น้ำโดยการพา ส่วนในด้านของชุดท่อตะแกรง ชุดชุดเปอร์ฮีเตอร์
 ชุดอีแวปโปเรเตอร์ จนกระทั่งถึง ชุดอีโคโนไมเซอร์จะมีการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างจากท่อน้ำในห้องเผา
 ไหม้อย่างเดียวคือ มีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งในที่นี้เราจะไม่นำมาคำนวณ
 ในขั้นตอนการออกแบบ ดังนั้นจึงเหลือเฉพาะการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการนำ แต่ในหม้อไอน้ำบาง
 แบบอาจจะมีการออกแบบให้ชุดชุดเปอร์ฮีเตอร์ เข้ามาอยู่ในห้องเผาไหม้ส่วนบนสุดเพื่อให้มีการถ่ายเทความ
 ร้อนแบบแผ่รังสีในกรณีที่ต้องการอุณหภูมิไอน้ำสูงมาก

ดังนั้นการออกแบบการถ่ายเทความร้อนของห้องเผาไหม้ เราจะเรียกว่า เขตแผ่รังสีความร้อน และกลุ่มท่อ
 น้ำตั้งแต่ชุดท่อตะแกรง ชุดชุดเปอร์ฮีเตอร์ จนกระทั่งชุดอีแวปโปเรเตอร์ เราจะเรียกว่า เขตพาความร้อน



รูปที่ 2.6 วงจรการไหลของน้ำและไอน้ำภายในหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

การไหลของน้ำและไอน้ำภายในหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ สามารถอธิบายได้จากจากรูปที่ 2.6 น้ำถูกดูดมาจากถังเก็บน้ำโดยปั๊มน้ำผ่านวาล์วกันกลับเข้าไปยังหม้ออັกกเก็บไอน้ำ โดยผ่านชุดอีโคโนไมเซอร์เพื่ออุ่นน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซสันดาป น้ำในหม้ออັกกเก็บไอน้ำจะถูกรักษาระดับน้ำไว้ให้คงที่โดยอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ การป้อนน้ำเข้าจะถูกป้อนแบบต่อเนื่อง (Modulating water feed) ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล ทั้งนี้เพื่อควบคุมอุณหภูมิในหม้ออັกกเก็บไอน้ำไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจส่งผลต่อโครงสร้างการรับแรงของวัสดุที่ใช้ทำหม้ออັกกเก็บไอน้ำ น้ำจากหม้ออັกกเก็บไอน้ำจะไหลลงด้านล่างผ่านทางท่อไอน้ำไหลลงซึ่งเรียกว่าท่อดาวน์คัมเมอร์ (Down comer pipe) ไปยังท่อรวมน้ำล่าง (Lower header) ผนังของหม้อไอน้ำทั้งหมดเป็นแบบผนังท่อเชื่อมต่อกันด้วยครีปเป็นผนังห้องเผาไหม้ ซึ่งต่อน้ำจากท่อรวมน้ำล่างรวมทั้งชุดอีแวปโปเรเตอร์ซึ่งมีหน้าที่ผลิตไอน้ำอัมตัวก็มีท่อเชื่อมต่อกับท่อดาวน์คัมเมอร์ ชุดท่อน้ำของผนังหม้อไอน้ำและชุดท่อน้ำของอีแวปโปเรเตอร์จะมีหน้าที่กำเนิดไอน้ำ เมื่อเกิดการสันดาปในห้องเผาไหม้ พลังงานความร้อนจะถ่ายเทไปที่ผนังท่อ ทำให้น้ำที่อยู่ภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการเดือด โดยธรรมชาติของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและเดือดจะเกิดการไหลขึ้นด้านบนบนตามธรรมชาติของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่า เราเรียกชุดท่อต่างๆที่น้ำไหลขึ้นนี้ว่า ท่อไรเซอร์ (Riser tube) ตามลักษณะการการไหลของน้ำ น้ำทั้งหมดของท่อไรเซอร์ที่ไหลขึ้นไปด้านบนจะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยท่อรวมน้ำบน น้ำบางส่วนจะไหลลงท่อดาวน์คัมเมอร์ข้างที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อไอน้ำเลยเพื่อไปปรับความร้อนอีกครั้ง และน้ำส่วนที่เหลือจะไหลเข้าไปในหม้ออັกกเก็บไอน้ำเพื่อไปรวมกับน้ำป้อนใหม่แล้วไหลลงท่อดาวน์คัมเมอร์ไปแทนที่น้ำที่ไหลขึ้นเป็นวงจรการไหลของเวียนน้ำ อัตราส่วนการไหลเวียนของน้ำในหม้อไอน้ำต่อไอน้ำแบบท่อไฟ ที่มีความดันไม่เกิน 70 bar gauge ประมาณ 15-30 ต่อ 1 ในหม้อไอน้ำความดันสูง 100-150 bar gauge อัตราการไหลเวียนของน้ำน้อยลงเหลือ 4-8 : 1

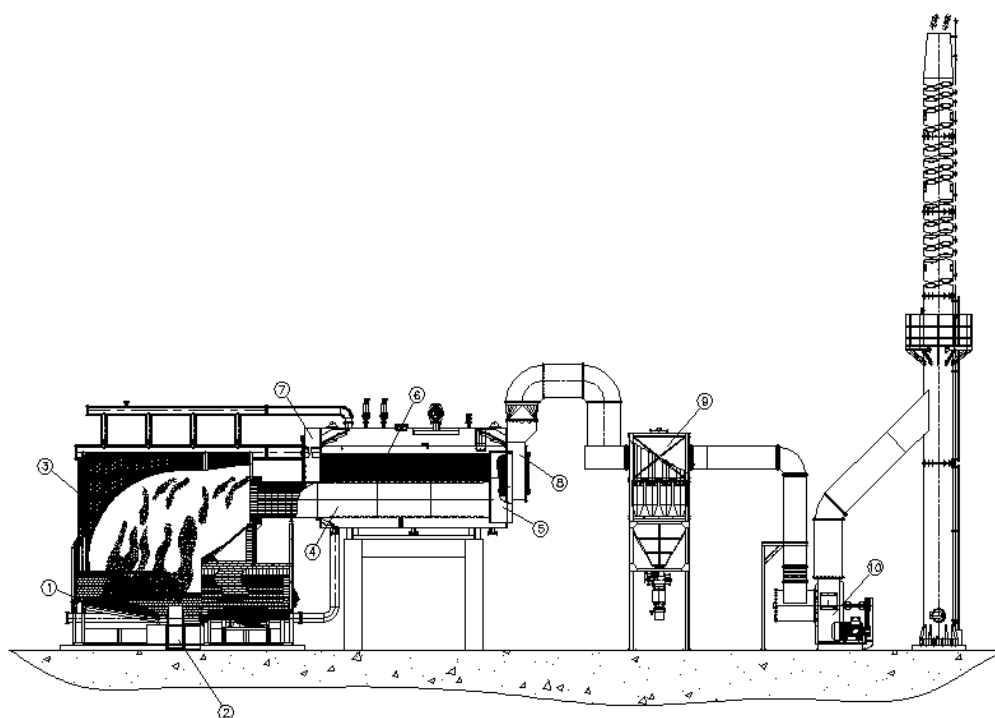
เท่านั้น ดังนั้นถ้าอัตราส่วนการไหลเวียนของน้ำลดลง จะทำให้หม้อไอน้ำสามารถกำเนิดไอน้ำได้เร็วขึ้น มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่วนน้ำที่กลายเป็นไอน้ำจะถูกแยกโดยท่อน้ำล้น (Overflow) ซึ่งทำหน้าที่รับน้ำที่ไหลล้น และแยกไอน้ำออกจากน้ำที่ไหลเวียนกลับเข้าหม้ออีกเก็บไอ โดยระดับของท่อน้ำล้นหรือจะเรียกว่าท่อแยกไอกี้ได้ขึ้นอยู่กับระดับผิวน้ำ ดังนั้นไอน้ำที่ไหลกลับจึงไปสะสมรวมไว้ที่เหนือระดับผิวน้ำในหม้ออีกเก็บไอ

2.4.3 หม้อไอน้ำแบบผสม

เป็นหม้อไอน้ำที่คิดค้นขึ้นจากการดัดแปลงให้หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำเอาห้องเผาไหม้ผนังน้ำแบบที่มีอยู่ในหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำมาใช้เป็นต้นกำเนิดพลังงาน ความร้อนแทนเครื่องพ่นไฟที่ใช้กับเชื้อเพลิงก๊าซและน้ำมัน ภายในห้องเผาไหม้มีตะกรับเตา สำหรับสันดาป เชื้อเพลิงแข็งกับอากาศ โดยส่วนนี้คือระบบสันดาป และอีกส่วนหนึ่งคือระบบน้ำและไอน้ำ โดยการนำเอาหม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ไม่มีเครื่องพ่นไฟมาเชื่อมต่อกับห้องเผาไหม้บริเวณทางออกของก๊าซสันดาป เพื่อให้ก๊าซสันดาปไหลเข้าไปถ่ายเทพลังงานความร้อนในระบบน้ำและไอน้ำ เชื่อมต่อท่อน้ำและท่อไอน้ำเข้าระหว่างระบบสันดาปกับระบบน้ำและไอน้ำ เพื่อให้ น้ำที่อยู่ภายในหม้ออีกเก็บไอได้ไหลเวียนเข้าไปในห้องเผาไหม้ ส่วนไอน้ำที่กำเนิดขึ้นจากผนังน้ำในห้องเผาไหม้ให้ไหลมากักเก็บไว้ในหม้ออีกเก็บไอ ในส่วนของห้องเผาไหม้จะกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ ส่วนในระบบน้ำและไอน้ำจะกำเนิดไอน้ำเหมือนกันกับหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ



รูปที่ 2.7 หม้อไอน้ำแบบผสม

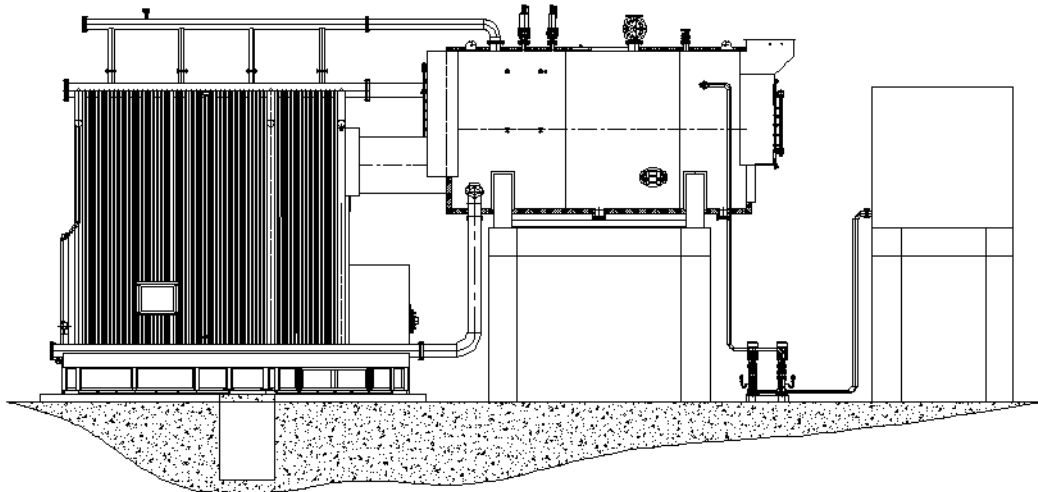


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหม้อไอน้ำแบบผสม

จากรูปที่ 2.8 ตะกรับเตา หมายเลข 1 เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนซึ่งได้จากการสันดาปของเชื้อเพลิงแข็งกับอากาศจากพัดลมเป่า หมายเลข 2 เกิดเป็นเปลวไฟลุกไหม้ ก๊าซร้อนลอยขึ้นด้านบนของห้องเผาไหม้ หมายเลข 3 การสันดาปโดยสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงกับอากาศจะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ หลังจากนั้นก็ก๊าซสันดาปจะไหลออกนอกห้องเผาไหม้เข้าไปยังท่อไฟใหญ่ หมายเลข 4 หลังจากนั้นก๊าซสันดาปจะไหลออกพันท่อไฟใหญ่ไปด้านหลังแล้วไหลวกกลับที่บริเวณ ห้องเปลี่ยนทิศทาง หมายเลข 5 ก๊าซร้อนจะไหลขึ้นบนเล็กน้อยและวกเข้าไปยังชุดท่อไฟเล็ก หมายเลข 6 ที่เรียงรายอยู่เป็นกลุ่มเหนือท่อไฟใหญ่ จากนั้นก๊าซร้อนจะไหลย้อนกลับทิศทางมายังด้านหน้า แล้วไหลเปลี่ยนทิศทางไปด้านตรงข้ามอีกครั้งที่ กล้องคว้นหน้า หมายเลข 7 โดยก๊าซร้อนนี้จะไหลวกกลับไปเข้ากลุ่มท่อไฟเล็กอีกกลุ่มหนึ่งแล้วไหลออกนอกตัวหม้อไอน้ำที่ กล้องคว้นหลัง หมายเลข 8 หลังจากนั้นก๊าซร้อนนี้จะเรียกว่าไอเสีย เพราะจะไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดเข้าสู่ระบบอีก โดยไอเสียจะไหลเข้าไปบำบัดในอุปกรณ์บำบัดไอเสีย หมายเลข 9 ไหลต่อไปยังพัดลมดูด หมายเลข 10 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสร้างและกำหนดอัตราการไหลของก๊าซร้อนและไอเสีย หลังจากนั้นไอเสียจะถูกปล่อยออกนอก ระบบสู่บรรยากาศภายนอก จากการไหลของก๊าซสันดาปตั้งแต่ในห้องเผาไหม้ ผ่านไปยังท่อไฟใหญ่และท่อไฟเล็ก จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาปเข้าสู่ระบบน้ำและไอน้ำ การถ่ายเทพลังงานความร้อนตั้งแต่เริ่มต้นในห้องเผาไหม้นั้น จะมีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นจากเปลวไฟ รวมกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นจากการไหลของก๊าซสันดาปไปสัมผัสผิวของท่อน้ำและครีปที่ทำเป็นผนังของห้องเผาไหม้ เมื่อผิวของท่อน้ำซึ่งทำจากโลหะได้รับพลังงานจากการถ่ายเทความร้อนจากทั้งสองแบบดังกล่าวแล้ว จะทำให้ผิวมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำเกิดขึ้นภายในผิวโลหะนี้ส่งไปยังผิวอีกด้านหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งมีน้ำอยู่ภายใน ผิวอีกด้านหนึ่งของท่อน้ำจะถ่ายเทความร้อนไปให้น้ำโดยการ

พา ส่วนในด้านของชุดท่อไฟใหญ่และท่อไฟเล็กภายในตัวหม้อไอน้ำจะมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการนำ

ดังนั้นการออกแบบการถ่ายเทความร้อนของห้องเผาไหม้ เราจะเรียกว่า เขตแผ่รังสีความร้อน และกลุ่มท่อไฟใหญ่และท่อไฟเล็ก เราจะเรียกว่า เขตพาความร้อน



รูปที่ 2.9 วงจรการไหลของน้ำและไอน้ำภายในหม้อไอน้ำแบบผสม

ส่วนในด้านการไหลของน้ำและไอน้ำนั้น สามารถอธิบายได้จากจากรูปที่ 2.7 เริ่มจากน้ำถูกดูดมาจากถังเก็บน้ำโดยปั๊มนี้ผ่านวาล์วกักเก็บเข้าไปยังเปลือกของหม้ออัดเก็บไอน้ำ (ตัวหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ) น้ำจะถูกกักเก็บไว้และรักษาระดับน้ำไว้ให้คงที่โดยอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ โดยน้ำจากหม้ออัดเก็บไอน้ำจะไหลลงไปเข้าผนังของห้องเผาไหม้ด้วยเนื่องจากมีท่อเชื่อมต่อถึงกัน เมื่อเกิดการสันดาปในห้องเผาไหม้ พลังงานความร้อนจะถ่ายเทไปที่ผนังท่อน้ำภายในห้องเผาไหม้ ทำให้น้ำที่อยู่ภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการเดือด โดยธรรมชาติของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและเดือดจะเกิดการไหลขึ้นด้านบน ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ ดังนั้นจึงเกิดวงจรไหลเวียนของน้ำภายในห้องเผาไหม้ โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลออกมาเข้าหม้ออัดเก็บไอน้ำบริเวณส่วนบนใกล้เคียงระดับผิวน้ำ ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลลงด้านล่างไปยังผนังห้องเผาไหม้ ส่วนน้ำที่กลายเป็นไอน้ำจะถูกแยกโดยท่อน้ำล้น ซึ่งทำหน้าที่รับน้ำที่ไหลล้นและแยกไอน้ำออกจากน้ำที่ไหลเวียนกลับเข้าหม้ออัดเก็บไอน้ำ โดยระดับของท่อน้ำล้นหรือจะเรียกว่าท่อแยกไอน้ำได้นี้อยู่เหนือระดับผิวน้ำ ดังนั้นไอน้ำที่ไหลกลับจึงไปสะสมรวมไว้ที่เหนือระดับผิวน้ำในหม้ออัดเก็บไอน้ำ ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นวงจรการไหลเวียนของน้ำในห้องเผาไหม้ โดยทุกรอบของน้ำที่ไหลเวียนเข้าไปจะมีส่วนหนึ่งที่กลายเป็นไอน้ำ ส่วนที่ไหลเวียนออกมาจะรวมตัวกับน้ำใหม่ไหลเวียนเข้าไปอีก ในส่วนของน้ำภายในหม้ออัดเก็บน้ำที่มีท่อไฟใหญ่และท่อไฟเล็กเป็นตัวถ่ายเทพลังงานความร้อนก็เช่นกันกับหลักการไหลเวียนน้ำของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ คือน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะไหลขึ้นไปยังระดับผิวน้ำด้านบน ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลลงสู่บริเวณด้านล่างของเปลือกหม้ออัดเก็บไอน้ำ

2.5 มาตรฐานการสร้างหม้อไอน้ำ

การสร้างหม้อไอน้ำแบบต่างๆ จะต้องดำเนินการตามมาตรฐาน ASME ของสหรัฐอเมริกา, มาตรฐาน EN ของสหภาพยุโรป, มาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น หรือมาตรฐานอื่นใดที่เทียบเท่ามาตรฐานสากล โดยครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบและการรับรองแบบ การเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ การควบคุมการผลิตและการตรวจสอบคุณภาพ จนกระทั่งถึงการติดตั้งและการรับรองหม้อไอน้ำ

การออกแบบโครงสร้างของหม้อไอน้ำจะไม่กล่าวไว้ในที่นี้

2.5.1 การเลือกหัวเผา (Burner Selection)

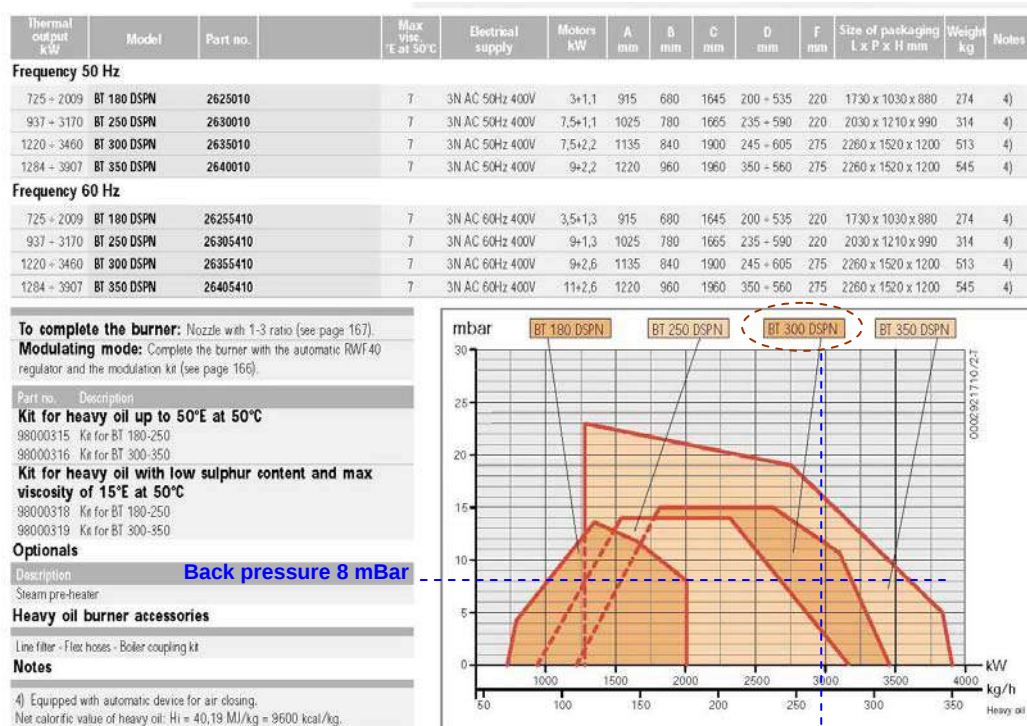
ตัวอย่างการเลือกหัวเผา

ต้องการเลือกหัวเผาแบบที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง สำหรับให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำที่มีอัตราการกำเนิดไอน้ำ 4 ton/h F&A 100 °C ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ 85% และมีความดันด้านการไหลของก๊าซร้อน (Boiler back pressure) ที่ 8 mbar

พลังงานที่หม้อไอน้ำผลิตได้ $4 \times 2257000/3600 = 2508 \text{ kW}$

หาพลังงานที่หม้อไอน้ำต้องการ $2508 / 0.85 = 2950 \text{ kW}$

จากรูปที่ 2.10 แกนตั้งของกราฟเป็นความดันด้านการไหลของก๊าซร้อน มีหน่วยเป็น mbar และแกนนอนของกราฟเป็นพลังงานความร้อนที่หัวเผาย่อยออกมาได้ มีหน่วยเป็น kW จากกราฟจะได้จุดตัดกันของเส้นแนวนอนและเส้นตั้งในพื้นที่ของหัวเผารุ่น BT 300 DSPN ดังนั้นหัวเผารุ่นนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับหม้อไอน้ำดังกล่าวข้างบน



รูปที่ 2.10 แผนภูมิแสดงการเลือกหัวเผา

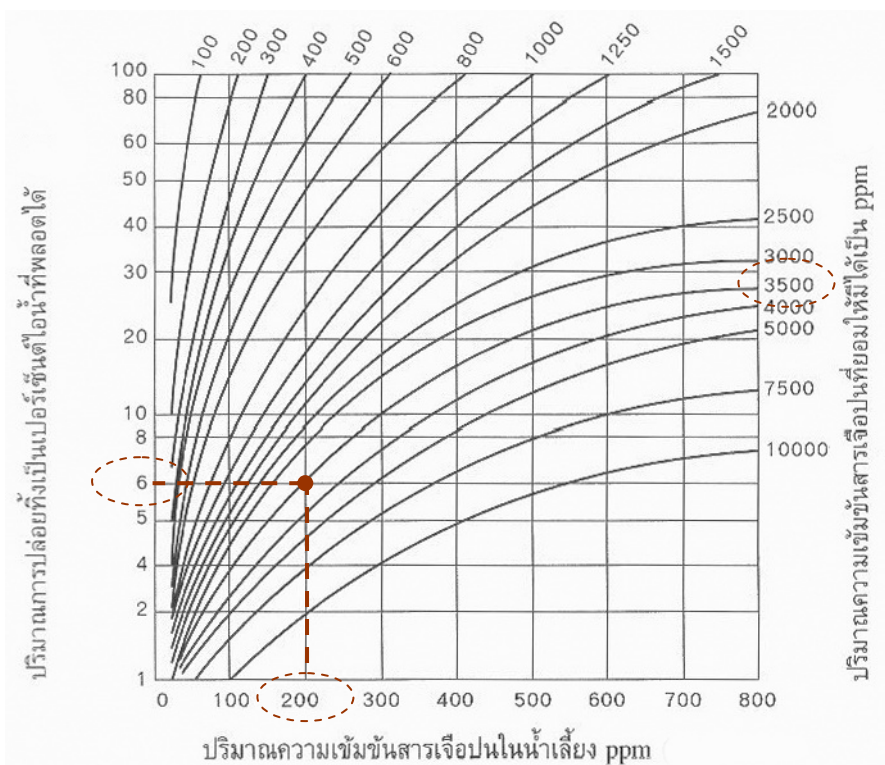
2.5.2 การเลือกวาล์วปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down Valve Selection)

เมื่อน้ำในหม้อน้ำระเหยกลายเป็นไอ สารต่างๆที่เจือปนในรูปของของแข็งละลายน้ำจะไม่ลอยขึ้นไปพร้อมกับไอน้ำ ดังนั้นจึงทำให้สารของแข็งที่ละลายในน้ำมีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้เกิดตะกอนภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหน่วยที่ 6 เรื่องคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำ

การปล่อยน้ำทิ้งออกนอกหม้อไอน้ำ เป็นวิธีการลดค่าความเข้มข้นของปริมาณของแข็งละลายน้ำรวม (Total dissolved solid) ซึ่งสามารถเรียกย่อๆ ว่า TDS มีหน่วยเป็น ppm โดยที่ TDS นั้นไม่ได้หมายถึงสารแขวนลอยในน้ำ (Total suspended solid, TSS) การลดค่า TDS นั้นไม่สามารถลดได้จากการทำให้ตกตะกอนเหมือนพวกสารแขวนลอย แต่สามารถทำได้โดยการปล่อยน้ำในระบบทิ้งออกไปแล้วเติมน้ำใหม่เข้ามาทดแทนเพื่อลดความเข้มข้นของ TDS แต่ถ้าหากมีการปล่อยน้ำทิ้งออกไปในปริมาณมาก ก็เกิดการสิ้นเปลืองน้ำและสูญเสียพลังงานความร้อน ดังนั้นจึงต้องหาอัตราการปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down rate) ในปริมาณที่เหมาะสมกับหม้อไอน้ำ โดยค่า TDS ที่แนะนำให้อยู่ที่หน่วยที่ 6 เรื่องคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำ

การหาอัตราการปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down rate)

ตัวอย่างการหาอัตราการปล่อยน้ำทิ้ง จากรูปที่ 2.11 หากป้อนน้ำที่มีค่า TDS 300 ppm เข้ามาเติมในหม้อไอน้ำ โดยที่ยังต้องการรักษาระดับค่า TDS ในหม้อไอน้ำไว้ไม่เกิน 3500 ppm จะต้องปล่อยน้ำทิ้งออกไปปริมาณ 6% ของอัตราการกำเนิดไอน้ำ เช่น อัตรากำเนิดไอน้ำ 1,000 kg/h ดังนั้นอัตราการปล่อยน้ำทิ้ง 60 kg/h ให้เลือกวาล์วปล่อยน้ำทิ้งที่มีอัตราการไหลของมวลน้ำได้ไม่ต่ำกว่า 60 kg/h ที่ความดันใช้งานปกติของหม้อไอน้ำนั้นๆ โดยการปล่อยน้ำทิ้งอาจจะทำเป็นช่วงเวลาหรือต่อเนื่องก็สามารถทำได้

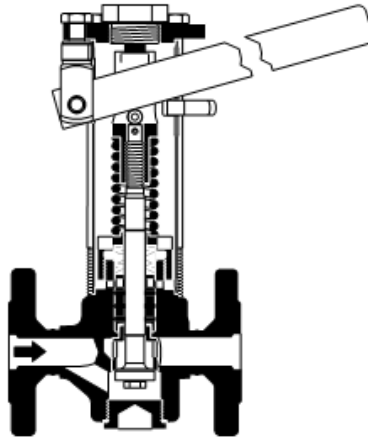


รูปที่ 2.11 ปริมาณการปล่อยน้ำทิ้งที่เหมาะสมของหม้อไอน้ำ

การเลือกใช้ระบบการปล่อยน้ำทิ้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

- การปล่อยน้ำทิ้งแบบใช้คน (Manual blow-down)

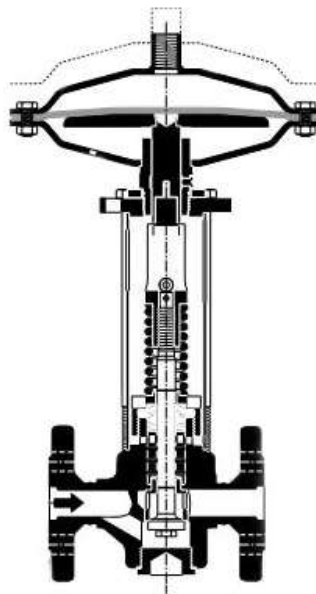
การปล่อยน้ำทิ้งแบบนี้เป็นการปล่อยน้ำทิ้งเป็นช่วงเวลาโดยใช้คนเป็นผู้ควบคุมการปิดเปิดวาล์วปล่อยน้ำทิ้งตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งวาล์วที่นำมาใช้คือ อินเตอร์มิทเทน โบลดาวน์วาล์ว แบบมีก้านโยก (Intermittent blow-down valve with manual lever) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อินเตอร์มิทเทน โบลดาวน์วาล์ว แบบมีก้านโยก

- การปล่อยน้ำทิ้งแบบตั้งเวลาอัตโนมัติ (Timing blow-down)

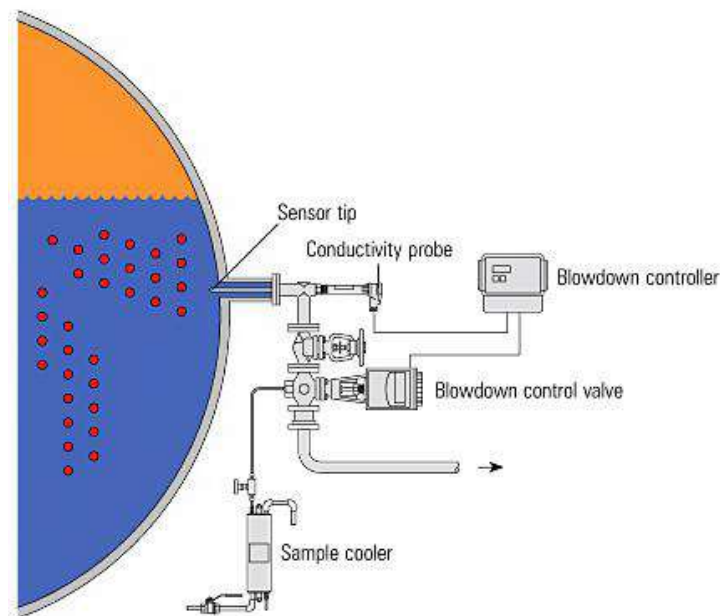
การปล่อยน้ำทิ้งแบบนี้เป็นการปล่อยน้ำทิ้งเป็นช่วงเวลาโดยใช้เครื่องตั้งเวลา (Timer) ไปควบคุมการปิดเปิดวาล์วปล่อยน้ำทิ้ง ซึ่งวาล์วที่นำมาใช้คือ อินเตอร์มิทเทน โบลดาวน์วาล์ว แบบมีหัวขั้วลม (Intermittent blow-down valve with pneumatic actuator) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่เครื่องตั้งเวลาไปควบคุมช่วงเวลาการทำงานของหัวขั้วลม ซึ่งหัวขั้วลมนี้จะเป็นตัวเปิดปิดวาล์วแทนคนในแบบแรกที่กำลังกล่าวมา



รูปที่ 2.13 อินเตอร์มิทเทน โบลดาวน์วาล์ว แบบมีหัวขั้วลม

- การระบายน้ำทิ้งแบบต่อเนื่อง (Continuous blow-down)

การปล่อยน้ำทิ้งแบบนี้เป็นการปล่อยน้ำทิ้งแบบต่อเนื่องโดยใช้เซนเซอร์ (Conductivity probe) วัดค่า TDS จริงที่อยู่ในหม้อไอน้ำ ณ ขณะเวลานั้น ค่า TDS ที่วัดได้จริงจะถูกส่งให้กับเครื่องควบคุม (Blow-down controller) จากนั้นเครื่องควบคุมจะคำนวณอัตราการปล่อยน้ำทิ้งให้โดยอัตโนมัติ โดยสอดคล้องกับพิกัดค่า TDS ที่ตั้งไว้ ทั้งนี้วาล์วปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down control valve) จะเปิดเป็นอัตราส่วนที่ทำให้การระบายน้ำออกไปเท่ากับอัตราการปล่อยน้ำทิ้งที่กำหนดในเครื่อง



รูปที่ 2.14 การระบายน้ำทิ้งแบบต่อเนื่อง

2.6 อุปกรณ์ความปลอดภัยของหม้อไอน้ำ

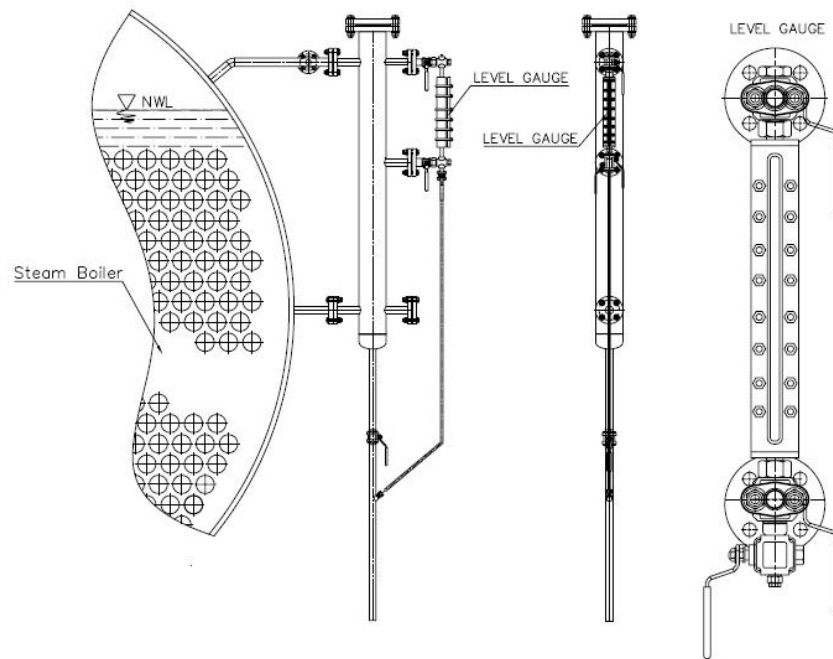
หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรที่ต้องได้รับการควบคุมการทำงานทุกขั้นตอน โดยที่อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยต้องทำงานได้แบบอัตโนมัติ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดจากการทำงานของคนผู้ควบคุม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมเพื่อความปลอดภัย ได้แก่

2.6.1 อุปกรณ์ควบคุมระบบน้ำ

2.6.1.1 แท่งแก้ววัดระดับน้ำ (Level sight glass / Level gauge)

ใช้สำหรับสังเกตระดับน้ำด้วยสายตา เพื่อให้ทราบถึงระดับน้ำภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งแท่งแก้ววัดระดับน้ำนี้จะติดตั้งอยู่ด้านนอกเปลือกของหม้ออั้งเก็บไอน้ำ โดยทั่วไปหม้อไอน้ำ 1 เครื่องควรติดตั้งแท่งแก้ววัดระดับน้ำไว้ 2 ชุด



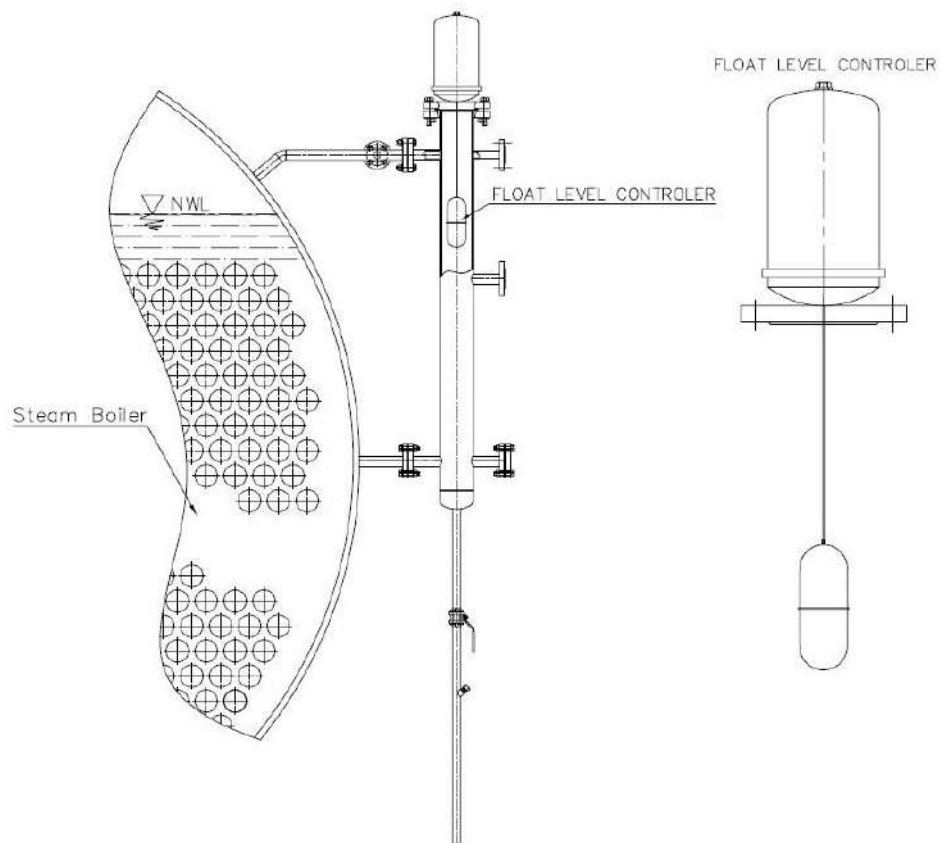
รูปที่ 2.15 แท่งแก้ววัดระดับน้ำ

2.6.1.2 อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำแบบลูกลอย

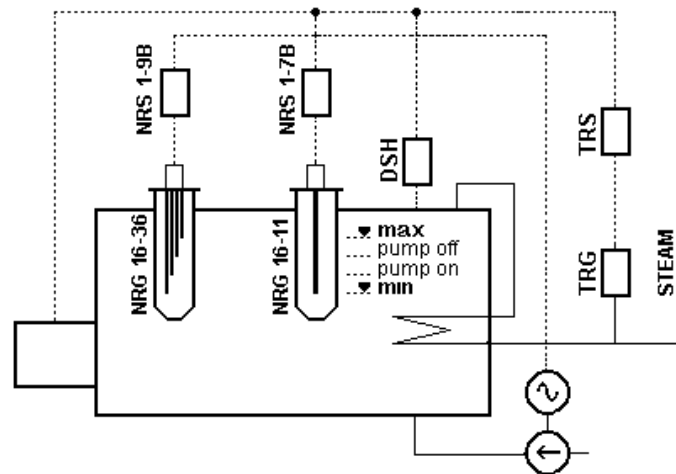
เป็นอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำในหม้อไอน้ำแบบกลไกผสมกับสัญญาณไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำที่ใช้ป้อนน้ำ ใช้หลักการทำงานของลูกลอยซึ่งปกติจะต้องลอยอยู่ที่ระดับผิวน้ำ ถ้ากระดับเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ระดับของลูกลอยเปลี่ยนแปลงไปด้วย

การควบคุมการป้อนน้ำแบบเป็นช่วงเวลา (On-off feed water control)

การควบคุมการป้อนน้ำแบบนี้ ปั๊มน้ำไม่ได้ป้อนน้ำเข้าตลอดเวลา แต่จะทำงานเป็นช่วงเวลาเท่านั้น เมื่อน้ำในหม้อไอน้ำลดระดับลงมาถึงระยะที่กำหนด เซนเซอร์จะส่งสัญญาณไฟฟ้าให้วงจรควบคุมปั๊มน้ำให้ทำการป้อนน้ำเข้าหม้อไอน้ำ เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงระยะที่กำหนดไว้ เซนเซอร์จะส่งสัญญาณให้วงจรควบคุมปั๊มน้ำให้หยุดทำงาน เซนเซอร์จะมีทั้งแบบก้านเดี่ยว และแบบหลายก้าน โดยสามารถตั้งระยะให้ปั๊มน้ำเริ่มทำงานและหยุดทำงาน รวมทั้งระยะสูงสุดของน้ำ (Max) และระยะต่ำของน้ำ (Min)



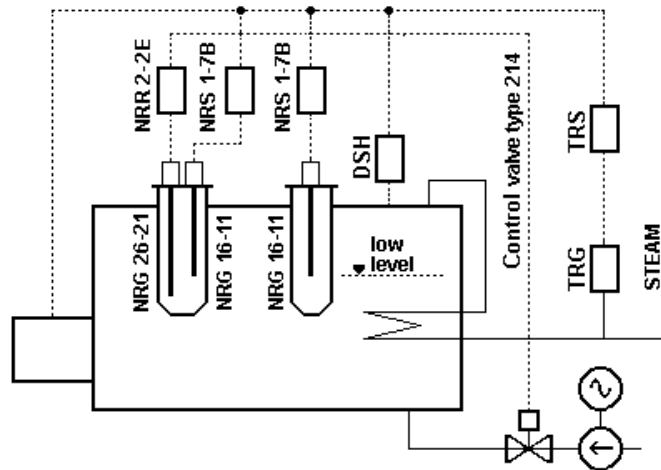
รูปที่ 2.16 อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำแบบลูกลอย



รูปที่ 2.17 อุปกรณ์ควบคุมการป้อนน้ำแบบเป็นช่วงเวลา

การควบคุมการป้อนน้ำแบบต่อเนื่อง (Modulating feed water control)

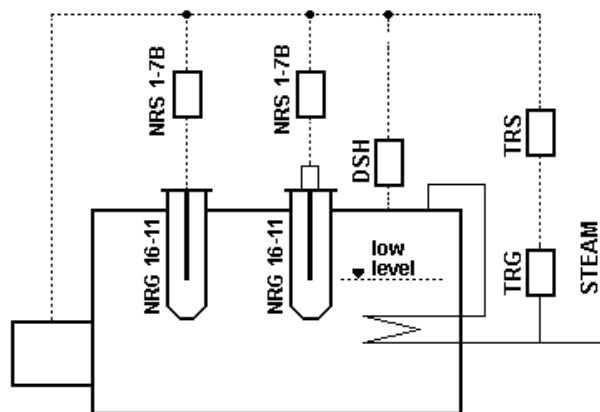
การควบคุมการป้อนน้ำแบบนี้ ป้อนน้ำจะทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเซนเซอร์จะส่งสัญญาณเข้าเครื่องควบคุมสั่งให้วาล์วควบคุมอัตราการไหลทำการปรับอัตราการไหลของน้ำป้อนให้สมดุลกับอัตราของน้ำที่ลดลง



รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ควบคุมการป้อนน้ำแบบต่อเนื่อง

2.6.1.3 อุปกรณ์ตรวจจับระดับน้ำต่ำสุดแบบก้านอิเล็กทรอนิกส์ (Extra low level sensor)

เป็นเซนเซอร์แบบก้านอิเล็กทรอนิกส์ก้านเดียวจุ่มลงไปในพื้นที่ที่ตรวจวัดระดับน้ำต่ำสุดที่ยอมรับได้ในหม้อไอน้ำ หากระดับน้ำต่ำกว่าปลายก้านอิเล็กทรอนิกส์ที่กำหนดไว้ เซนเซอร์จะส่งสัญญาณไฟฟ้าให้กัปเวจตรวจพบการสั่นไหวให้หยุดทำงาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภาวะแห้งไหม้ไอน้ำ



รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ตรวจจับระดับน้ำต่ำสุดแบบก้านอิเล็กทรอนิกส์

ระดับน้ำต่ำสุดในหม้อไอน้ำแบบต่างๆ

- หม้อไอน้ำแบบท่อไฟและแบบผสม ต้องมีระยะไม่ต่ำกว่า 100 mm เหนือผิวท่อไฟ
- หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ ต้องไม่ต่ำกว่า 100 mm จากระดับศูนย์กลางของหม้อกักเก็บไอน้ำ

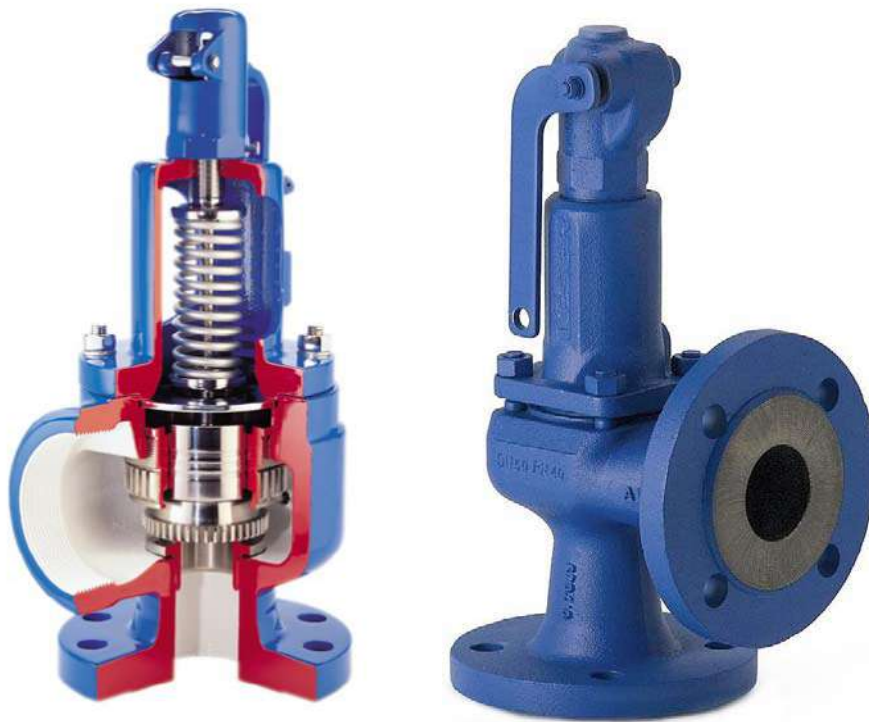
2.6.2 อุปกรณ์ควบคุมความดันไอน้ำ

2.6.2.1 ลีนินรภัย

ลีนินรภัย หรือเซฟตี้วาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในหม้อไอน้ำ ลีนินรภัยจะเปิดขึ้นเพื่อระบายไอน้ำออกสู่บรรยากาศภายนอกหากความดันในหม้อไอน้ำเกินพิกัดที่ตั้งไว้ และจะปิดลงเมื่อความดันไอน้ำลดลงต่ำกว่าพิกัดที่ตั้งไว้ ดังนั้นลีนินรภัยจึงทำหน้าที่รักษาระดับความดันไม่ให้เกินกว่าพิกัดที่ตั้งไว้ เป็นการป้องกันการระเบิดด้วยเหตุอันเนื่องมาจากความดันไอน้ำเกินพิกัด ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อการใช้งาน ลีนินรภัยที่นิยมใช้เป็นแบบสปริงดันกลับ

หลักเกณฑ์การติดตั้งลีนินรภัย

- หม้อไอน้ำทุกเครื่องต้องติดตั้งลีนินรภัยอย่างน้อย 2 ตัว สำหรับหม้อไอน้ำที่มีพื้นที่ผิวรับความร้อนมากกว่า 50 m²ขึ้นไป
- ควรตั้งพิกัดความดันของลีนินรภัยให้ระบายความดันได้ไม่เกิน 1.1 เท่าของความดันใช้งานปกติ โดยดูตามความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน แต่ต้องไม่เกิน 1.03 เท่าของความดันอนุญาตใช้งานสูงสุดของหม้อไอน้ำ (Max. allowable working pressure)



รูปที่ 2.20 ลีนินรภัยแบบมีคันโยก

ตัวอย่างการเลือกใช้ลิ้นนรภัย

ต้องการเลือกลิ้นนรภัยเพื่อระบายไอน้ำ 6,000 kg/h ที่ระดับความดัน 10 bar gauge จากตารางที่ 2.1 จะสามารถเลือกได้ขนาด DN 50 อัตราการระบายสูงสุดที่ 7290 kg/h และช่วงปรับตั้งสปริงที่ 9.1-16 bar

ตารางที่ 2.1 แสดงการเลือกใช้ลิ้นนรภัย

Capacity saturated steam / air incl.10% overpressure

Set gauge pressure bar	I Saturated steam in kg/h																II Air 0°C and 1.013 bara in Nm³/h							
	DN 20		DN 25		DN 32		DN 40		DN 50		DN 65		DN 80		DN 100		DN 125		DN 150					
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0.2	81	95	126	148	210	246	324	380	506	594	855	1003	1295	1520	2024	2375	2510	2945	3490	4100				
0.4	120	143	185	223	307	370	473	570	739	891	1250	1505	1890	2280	2960	3565	3630	4380	5050	6090				
0.5	132	161	207	252	344	419	529	646	827	1009	1400	1705	2120	2585	3310	4035	4070	4970	5660	6910				
0.6	147	182	230	284	383	472	590	728	923	1135	1560	1920	2360	2910	3690	4545	4470	5520	6220	7675				
0.8	174	218	272	341	453	567	698	873	1090	1365	1840	2305	2790	3490	4360	5460	5240	6555	7280	9115				
1	203	255	317	398	526	661	811	1019	1270	1590	2140	2690	3245	4075	5070	6370	6030	7575	8385	10530				
1.5	272	344	425	538	707	894	1090	1378	1700	2150	2875	3640	4355	5510	6800	8610	8050	10195	11200	14180				
2	305	388	477	607	792	1008	1220	1550	1900	2425	3220	4100	4880	6210	7625	9700	10125	12890	14080	17920				
2.5	366	468	572	731	950	1215	1460	1870	2285	2925	3865	4945	5855	7490	9145	11700	11990	15330	16680	21300				
3	424	544	662	850	1100	1410	1695	2175	2645	3400	4475	5750	6775	8700	10600	13600	13880	17840	19300	24800				
4	535	692	837	1080	1390	1800	2140	2770	3350	4330	5650	7310	8570	11080	13400	17300	17550	22725	24400	31600				
5	640	834	1000	1300	1665	2180	2565	3330	4000	5210	6770	8800	10260	13340	16000	20840	21000	27350	29250	38000				
6	745	975	1165	1520	1940	2530	2980	3900	4605	6090	7890	10300	11950	15600	18650	24370	24500	31900	34050	44400				
7	850	1115	1330	1745	2210	2900	3400	4465	5320	6970	9000	11790	13600	17860	21300	27900	27900	36600	38800	50900				
8	957	1255	1495	1965	2485	3260	3820	5030	5980	7860	10100	13280	15300	20100	23900	31430	31350	41200	43600	57300				
9	1060	1395	1660	2185	2755	3630	4245	5590	6555	8740	11200	14770	16950	22370	26500	34960	34800	45800	48400	63800				
10	1165	1540	1820	2400	3025	3990	4665	6150	7290	9610	12300	16250	18650	24600	29150	38500	38250	50500	53200	70200				
11	1270	1680	1985	2625	3300	4360	5080	6750	7940	10500	13400	17750	20300	26900	31750	42000	41600	55100	58000	76600				
12	1375	1820	2150	2845	3570	4730	5500	7290	8590	11380	14500	19240	22000	29150	34350	45500	45100	59700	62700	83100				
13	1480	1960	2310	3070	3840	5090	5920	7850	9250	12270	15600	20730	23650	31400	37000	49000	48500	64400	67500	89500				
14	1580	2100	2475	3290	4110	5460	6340	8400	9900	13150	16700	22200	25350	33650	39600	52600	52000	69000	72300	96000				
15	1690	2245	2640	3500	4385	5830	6760	8980	10550	14030	17800	23700	27000	35900	42200	56100	55400	73600	77000	102400				
16	1790	2385	2800	3725	4655	6190	7170	9640	11200	14900	18950	25200	28700	38200	44000	58000	56800	76200	81800	108800				
17	1900	2530	2965	3950	4930	6560	7590	10100	11850	15800	20050	26700	30350	40400	47400	63100	62200	82900	88600	115300				
18	2000	2670	3130	4170	5200	6920	8010	10670	12500	16650	21150	28100	32050	42700	50100	66700	65700	87500	91400	121700				
19	2100	2800	3295	4390	5470	7300	8430	11240	13150	17550	22250	29600	33700	44900	52700	70200	69100	92100	96200	128100				
20	2210	2950	3460	4610	5750	7660	8850	11800	13800	18400	23350	31150	35400	47200	55300	73700	72600	96800	101000	134600				
21	2320	3090	3620	4830	6020	8020	9250	12370	14500	19300	24500	32650	37100	49400	57900	77300	76000	101400	105800	141000				
22	2420	3230	3790	5050	6290	8390	9700	12930	15150	20200	25600	34150	38800	51700	60600	80800	79500	106000	110900	147500				
24	2635	3515	4120	5490	6840	9120	10500	14060	16450	21970	27850	37100	42100	56200	65900	87900	86500	115300	120600	160400				
25	2740	3655	4280	5710	7120	9490	10950	14620	17100	22850	28950	38600	43800	58500										
26	2850	3800	4450	5930	7390	9850	11350	15190	17800	23730	30050	40100												
28	3060	4080	4780	6370	7950	10600	12250	16320	19100	25500	32300	43100												
30	3270	4360	5120	6810	8500	11320	13100	17450	20450	27250														
32	3490	4640	5450	7250	9060	12050	13950	18570	21800	29000														
34		4925		7700		12790		19700		30800														
40		5770																						

Stainless steel execution max. 24 bar for saturated steam

TÜV - SV - -663 - D/G
Calculation acc. to TRD 421 and AD-leaflet A2
DN125, DN150 higher pressures on request

Spring ranges in bar (gauge)						
DN 20	DN 25 - 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150
0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.4	0.2 - 0.5
0.52 - 1	0.52 - 1	0.52 - 1	0.52 - 1	0.52 - 1	0.42 - 0.75	0.52 - 1
1.05 - 1.5	1.05 - 1.5	1.05 - 1.5	1.05 - 1.5	1.05 - 1.5	0.77 - 1.1	1.05 - 1.5
1.55 - 2.5	1.55 - 2	1.55 - 2	1.55 - 2	1.55 - 2	1.15 - 1.5	1.55 - 1.9
2.55 - 4.5	2.05 - 2.7	2.05 - 2.7	2.05 - 2.7	2.05 - 2.5	1.55 - 1.9	1.95 - 2.3
4.6 - 8.5	2.75 - 3.6	2.75 - 3.6	2.75 - 3.6	2.55 - 3	1.95 - 2.5	2.35 - 2.7
8.6 - 19	3.7 - 5	3.7 - 5	3.7 - 5	3.05 - 3.6	2.55 - 2.95	2.75 - 3.3
19.1 - 28	5.1 - 9	5.1 - 9	5.1 - 9	3.7 - 5	3 - 4	3.35 - 4.1
28.1 - 35	9.1 - 16	9.1 - 16	9.1 - 14	5.1 - 9	4.1 - 5.7	4.2 - 5.5
35.1 - 40	16.1 - 22	16.1 - 22	14.1 - 19	9.1 - 14	5.8 - 8.2	5.6 - 7.4
	22.1 - 28	22.1 - 28	19.1 - 25	14.1 - 19	8.3 - 12	7.5 - 11
	28.1 - 34			19.1 - 24	12.1 - 17	11.1 - 16
					17.1 - 24	16.1 - 21
					24.1 - 27	21.1 - 26

Sizing	For steam, air and water see capacity tables, calculation acc. to DIN 3320 part 1, TRD 421 and AD-A2, necessary information for valve layout:
Medium gasform:	Mass flow (kg/h), molar mass (kg/kmol), temperature (°C), set gauge pressure (bar), back gauge pressure (bar)
Medium liquid:	Mass flow (kg/h), density (kg/m³), viscosity, temperature (°C), Set gauge pressure (bar), back gauge pressure (bar)
Order data:	ARI-SAFE-safety valve - Figure, DN, PN, Material, set gauge pressurebar

2.6.2.2 สวิตช์ควบคุมความดัน (Pressure switch)

ใช้เพื่อควบคุมความดันของไอน้ำในหม้อไอน้ำ ไม่ให้เกินกว่าพิกัดค่าที่ตั้งไว้

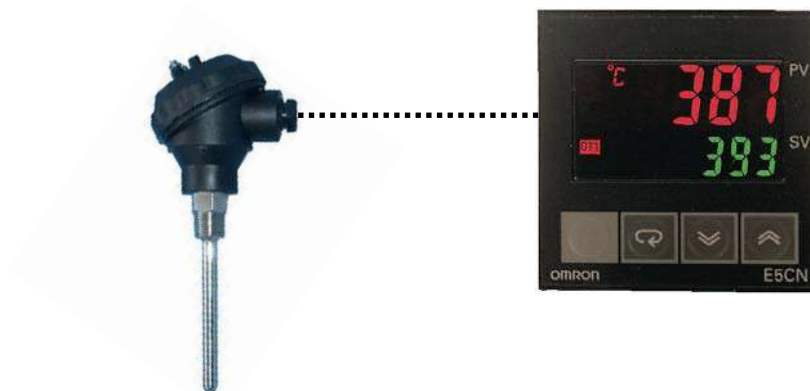


รูปที่ 2.21 สวิตช์ควบคุมความดัน

2.6.3 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิไอเสีย

2.6.3.1 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิไอเสีย

ใช้เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิไอเสียที่วัดได้และตรวจจับอุณหภูมิไอเสียที่เกินกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้เพื่อส่งสัญญาณให้ระบบควบคุมหยุดการทำงานของหม้อไอน้ำ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นผิดปกติ



รูปที่ 2.22 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิไอเสีย

2.7 วิธีการติดตั้งหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ

การติดตั้งหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ มีขั้นตอนการดำเนินการอยู่ใน 4 ช่วงเวลา ดังนี้

- ช่วงเวลาเตรียมการติดตั้ง (Preparation Period)
- ช่วงเวลาระหว่างติดตั้ง (Installation Period)
- ช่วงเวลาเริ่มติดเครื่องและปรับแต่งการทำงาน (Start-up and Commissioning Period)
- ช่วงเวลาส่งมอบงาน (Handover Period)

2.7.1 ช่วงเวลาเตรียมการติดตั้ง (Preparation Period)

2.7.1.1 การจัดเตรียมข้อมูลด้านตัวเครื่องจักรและอุปกรณ์ประกอบ (Engineering Data)

- เอกสารแจ้งรายละเอียดการส่งของและน้ำหนัก (Packing list and weight information)
- แบบทั่วไปแสดงภาพรวมของงาน (Plant general arrangement drawing)
- แบบฐานรากของหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ (Foundation drawing)
- แบบของชิ้นส่วน โครงสร้างที่จะติดตั้ง (Shop drawing)
- แผนภาพแสดงการทำงานของระบบโดยรวม (Process & Instrument diagram, P&ID)
- แบบงานท่อ (Piping drawing)
- แบบแสดงวิธีการติดตั้งชิ้นส่วน (Erection drawing)
- ข้อมูลแสดงการรับน้ำหนักของพื้นดิน ในบริเวณทำงาน (Ground pressure information)
- ข้อมูลทางเทคนิคของวัสดุที่ใช้ (Material specification)
- ข้อมูลทางเทคนิคงานเครื่องกล (Machinery specification)
- ข้อมูลทางเทคนิคงานไฟฟ้า (Electrical works specification)
- ข้อมูลทางเทคนิคงานอุปกรณ์วัดคุม (Instrument works specification)
- ข้อมูลทางเทคนิคงานอิฐและคอนกรีตทนไฟ (Refractory works specification)
- ข้อมูลทางเทคนิคงานฉนวนทนความร้อน (Insulation works specification)

2.7.1.2 การจัดเตรียมข้อมูลด้านวิธีติดตั้ง (Installation Data)

- เงื่อนไขของสัญญาและขอบเขตการทำงาน
- แผนการทำงานหลัก (Master plan)
- แผนการประกันคุณภาพและการตรวจสอบคุณภาพ (QA/QC plan)
- สถานะการรับของ (Material arrival status)
- ข้อมูลวิธีการเชื่อม (Welding procedure specification, WPS)
- ข้อมูลการอ้างอิงตำแหน่งและการวางผัง (Bench marking and lay-out data)
- ข้อมูลขั้นตอนการทดสอบความดันด้วยน้ำ (Hydrostatic pressure test procedure)
- ข้อมูลขั้นตอนการทำความสะอาดภายใน (Flushing procedure)
- ข้อมูลการปรับตั้งลิ้นนิรภัย (Safety valve setting data)
- ข้อมูลการปรับตั้งอุปกรณ์วัดคุม (Instrument calibration data)

- ข้อมูลขั้นตอนการทดสอบฟังก์ชันการทำงาน (Functional test procedure)
- ข้อเสนอแนะในการปรับแต่งการทำงาน (Commissioning guidance)
- ข้อมูลวิธีการทดสอบสมรรถนะของหม้อไอน้ำ (Performance examination)

2.7.1.3 การจัดเตรียมแรงงาน (Manpower Preparation)

- ฝั่งองค์กรของหน่วยงานติดตั้ง (Project organization)
- แผนการจัดการแรงงาน (Manpower schedule)
- การจัดการด้านความปลอดภัยในการทำงาน (Safety management)
- การทดสอบฝีมือช่างเชื่อม (Welder qualification)

2.7.1.4 การจัดเตรียมเครื่องจักรกลหนักและเครื่องมือ (Equipment and Tool Preparation)

- การจัดเตรียมงานขนส่ง (Transportation arrangement)
- การจัดเตรียมเครนยกของ (Lifting crane arrangement)
- การจัดเตรียมเครื่องมือใช้ในการติดตั้ง (Tool preparation)
- การสอบเทียบเครื่องมือวัด (Tool calibration)
- อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคล (Personal protection equipment, PPE)
- อุปกรณ์ดับเพลิง (Fire extinguisher)
- อุปกรณ์สื่อสารที่จำเป็น (Necessary communication devices)
- ยานพาหนะขนส่ง คน เครื่องมือ (Vehicle)

2.7.1.5 การจัดเตรียมหน้างาน (Site Preparation)

- การควบคุมแผนงาน (Project scheduling)
- การควบคุมเอกสาร (Document control)
- การทำจุดอ้างอิงและวางผังในหน้างานจริง (Project bench marking and lay-out)
- การตรวจสอบการรับน้ำหนักของพื้นดิน (Ground pressure inspection)
- การตรวจวัดฐานราก (Foundation measurement)
- การกั้นเขตพื้นที่การทำงาน (Battery limit)
- การจัดเตรียมสาธารณูปโภคและการรักษาความปลอดภัย (Facilities and security)
- การตรวจสอบเครนและอุปกรณ์การยกก่อนใช้งาน (Crane and lifting gear inspection)
- การตรวจสอบเครื่องมือใช้งาน (Tools inspection)
- การเคลื่อนย้ายแรงงาน เครื่องจักรกลหนัก เครื่องมือ เข้าหน้างาน (Mobilization)

2.7.2 ช่วงเวลาระหว่างติดตั้ง (Installation Period)

2.7.2.1 การติดตั้งชิ้นส่วน (Erection of Component)

- การขนส่งชิ้นส่วนเข้าหน้างาน (Transportation of component)
- การเตรียมชิ้นส่วนก่อนยกประกอบ (Component dress-up)
- การจัดอุปกรณ์การยก (Lifting gear set-up)

- การจัดการเครนให้พร้อมยก (Crane set-up)
- การจัดวางตำแหน่งจุดเครน (Crane positioning)
- ตั้งนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากจำเป็น (Scaffolding and/or temporary support)
- การยกชิ้นส่วนเข้าติดตั้ง (Erection)
- การปรับตั้งศูนย์ของชิ้นส่วน (Static alignment)
- การขนย้ายเครื่องจักรกลท่อนแรงออกนอกหน้างาน (Demobilization of equipment)

2.7.2.2 การติดตั้งงานท่อ (Piping Works)

- การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมืองานท่อ (Equipment and tool preparation for piping works)
- ตั้งนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากจำเป็น (Scaffolding and/or temporary support)
- การตรวจสอบวัสดุที่นำมาใช้ในงาน (Material inspection)
- การติดตั้งตัวรองท่อและชั้นวางท่อ (Pipe support and pipe rack and installation)
- การประกอบท่อเป็นส่วนย่อย (Pipe line fit-up partially)
- การติดตั้งเส้นท่อ (Pipe line installation)
- การตรวจสอบศูนย์ของเส้นท่อ (Pipe line alignment inspection)
- การเชื่อมท่อ (Pipe welding)
- การตรวจสอบแนวเชื่อมท่อ (Welding joint inspection)
- การทาสีแนวเชื่อม (Welding joint painting)
- การทดสอบความสามารถในการรับความดันด้วยน้ำ (Hydrostatic pressure test)
- การทำความสะอาดภายในท่อ (Pipe line flushing)
- รื้อถอนนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากมี (Scaffolding and/or temporary support)

2.7.2.3 การทำงานอิฐและคอนกรีตทนไฟ (Brick and Refractory Works)

- ตั้งนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากจำเป็น (Scaffolding and/or temporary support)
- การติดตั้งสมอตัววาย (Y-anchor installation)
- การทำงานอิฐและคอนกรีตทนไฟ (Brick and refractory making)
- การตรวจสอบงานอิฐและคอนกรีตทนไฟ (Brick and refractory inspection)
- รื้อถอนนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากมี (Scaffolding and/or temporary support)
- การบ่มคอนกรีตทนไฟ (Refractory curing)
- การตรวจสอบงานคอนกรีตทนไฟด้วยสายตา (Refractory visual check)

2.7.2.4 การทำงานติดตั้งฉนวนความร้อน (Insulation Works)

- ตั้งนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากจำเป็น (Scaffolding and/or temporary support)
- การยึดโครงรับการหุ้มฉนวน (Insulation frame support fixing)
- การหุ้มแผ่นฉนวน (Insulation blanket cladding)
- การหุ้มแผ่นปิดทับฉนวน (Insulation cover sheet cladding)
- รื้อถอนนั่งร้านและอุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราว-หากมี (Scaffolding and/or temporary support)

2.7.2.5 การติดตั้งอุปกรณ์ประกอบ (Trimming Part Installation)

- การติดตั้งปั้มน้ำ (Water pump installation)
- การติดตั้งวาล์วและอุปกรณ์วัดคุม (Valve and instrument installation)
- การตั้งค่าล้นนิรภัย (Safety valve setting)

2.7.2.6 การทำงานติดตั้งระบบไฟฟ้า (Electrical Works)

- การตรวจสอบวัสดุที่นำมาใช้ (Material inspection)
- การติดตั้งถาดรับสาย (Cable tray installation)
- การติดตั้งตู้ควบคุม (Control panel installation)
- การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและเซนเซอร์ต่างๆ (Electric motor and sensor probe installation)
- การติดตั้งระบบสายดิน (Grounding installation)
- การร้อยสายไฟฟ้า (Cable wiring)
- การตรวจสอบการร้อยสายไฟฟ้า (Wiring inspection)
- การต่อไฟฟ้าจากภายนอกเข้าระบบ (Main power connect)
- การทดสอบการทำงานในแต่ละชุด (Individual power test)
- การทดสอบระบบป้องกันกระแสเกิน (Overload setting)
- การทดสอบการรับส่งสัญญาณ (Signal transmitter and receiver setting)
- การตั้งค่าอุปกรณ์ควบคุม (Controller setting)
- การทดสอบวงจรการทำงาน (Control loop test)
- การทดสอบฟังก์ชันการทำงาน (Functional test)

2.7.3 ช่วงเวลาเริ่มติดเครื่องและปรับแต่งการทำงาน (Start-up and Commissioning Period)

2.7.3.1 การทดสอบระบบน้ำ (Water System Examination)

- การทำความสะอาดภายในหม้อไอน้ำและท่อ (Boiler and water pipe line flushing)
- การตั้งค่าอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ (Water level controller setting)
- การทดสอบระบบแจ้งเตือนระดับน้ำต่ำ (Water level alarm test)
- การทดสอบระบบร่วมกับปั้มน้ำ (Water pump synchronized control test)
- การทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down functional test)

2.7.3.2 การทดสอบระบบเชื้อเพลิง (Fuel System Examination)

- การตั้งค่าอุปกรณ์ควบคุมเชื้อเพลิง (Fuel controller setting)
- การทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบเชื้อเพลิง (Fuel system functional test)
- การทดสอบการทำงานแบบตัวเปล่า (Dry learn for fuel burning rate)
- การทดสอบระบบร่วมกับระบบอื่นที่เกี่ยวข้อง (Synchronizing control test)

2.7.3.3 การทดสอบระบบป้อนอากาศ (Air Feeding System Examination)

- การทดสอบพัดลมแต่ละชุด (Air fan individual test)

- การทดสอบระบบควบคุมร่วมกับระบบอื่นที่เกี่ยวข้อง (Synchronizing control test)
- 2.7.3.4 การทดสอบระบบจัดการขี้เถ้าหรือของเหลือ (Ash or Residual Removal System Examination)
- การทดสอบระบบลำเลียงขี้เถ้าในแต่ละชุด (Ash conveyor individual test)
 - การทดสอบระบบร่วมกับระบบอื่นที่เกี่ยวข้อง (Synchronizing control test)
- 2.7.3.5 การติดเครื่องและทำความสะอาดไอน้ำ (Start-up and Boil-out)
- การเดินเครื่องครั้งแรก (Initial start-up)
 - การทดสอบระบบหยุดเครื่องฉุกเฉิน (Emergency stop test)
 - ช่วงเวลาการทำงานที่ความดันไอน้ำต่ำ (Boiler run-in)
 - การทดสอบการ校มูลจริงของอุปกรณ์วัดคุมเทียบกับอุปกรณ์วัดมาตรฐาน (Instrument calibration)
 - การปรับแต่งละเอียดของอุปกรณ์ควบคุม (Fine tune of controller)
 - การทำความสะอาดไอน้ำ (Boil-out)
- 2.7.3.6 การปรับแต่งการทำงานของหม้อไอน้ำ (Boiler Commissioning)
- การปรับแต่งระบบการเผาไหม้ (Fuel burning rate tune-up)
 - การปรับแต่งความดันห้องเผาไหม้ (Draft pressure tune-up)
 - การปรับตั้งอัตราการป้อนน้ำ (Water feeding rate adjusting)
 - การปรับตั้งอัตราการปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down rate adjusting)
 - การปรับตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิและความดันไอน้ำ (Steam Temperature and Pressure control system adjusting)
 - การทดสอบการทำงานของลิ้นนิรภัย (Safety valve test)
 - การเก็บข้อมูลด้านสมรรถนะหม้อไอน้ำ (Boiler performance data recording)
 - การทดสอบการทำงานของระบบปล่อยน้ำทิ้ง (Blow-down test)
- 2.7.4 ช่วงเวลาส่งมอบงาน (Handover Period)
- 2.7.4.1 การทดสอบสมรรถนะของหม้อไอน้ำ (Performance Examination)
- 2.7.4.1.1 การทดสอบอัตราการกำเนิดไอน้ำ (Evaporation Rate Examination)
 - 2.7.4.1.2 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption Rate Examination)
 - 2.7.4.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพการสันดาป (Combustion Efficiency Examination)
 - 2.7.4.1.4 การทดสอบประสิทธิภาพรวมของหม้อไอน้ำ (Boiler Efficiency Examination)
- 2.7.4.2 การส่งมอบงาน (Handover Packages)
- 2.7.4.2.1 รายงานการผลิต (Manufacturing Report)
 - 2.7.4.2.2 รายงานการติดตั้ง (Installation Report)
 - 2.7.4.2.3 รายงานการปรับแต่งการทำงาน (Commissioning Report)
 - 2.7.4.2.4 รายงานการทดสอบสมรรถนะของหม้อไอน้ำ (Performance Examination)

- 2.7.4.2.5 คู่มือการใช้งานหม้อไอน้ำ (Operation Manual)
- 2.7.4.2.6 คู่มือการซ่อมบำรุงหม้อไอน้ำ (Maintenance Manual)
- 2.7.4.2.7 เอกสารรับรองความปลอดภัยหม้อไอน้ำ (Boiler Certificate)

2.8 เอกสารอ้างอิง

- 2.8.1 THERMODYNAMICS: An Engineering Approach, Yunus A. Cengel, Michael A. Boiles, ISBN 0-07-100494-7
- 2.8.2 Boilers, Evaporators & Condensers, Sadik Kakac, ISBN 0-47-162170-6
- 2.8.3 Mekaterm Boiler Installation Guidance, Thai K. Boiler Co., Ltd.
- 2.8.4 เทคโนโลยีไอน้ำ, วิวัฒน์ ภัททิยธนี, ISBN 9-74-512572-5
- 2.8.5 การถ่ายเทความร้อน, สุนันท์ ศรีณขนิตย์, ISBN 9-74-812185-2

หน่วยที่ 3 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ

ภาชนะรับแรงดันไอน้ำเป็นอุปกรณ์การใช้ไอน้ำ ซึ่งมีการกักเก็บไอน้ำและมีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศปกติ ในการพิจารณาตรวจสอบหรือการใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญ

3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นการแนะนำพื้นฐานการทำงานและการตรวจสอบสภาพการใช้งานรวมถึงระบบการใช้ไอน้ำของอุปกรณ์รับแรงดันไอน้ำอย่างปลอดภัย ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.2 ขอบเขตและนิยาม

3.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตของงานเฉพาะพื้นฐานการทำงานการใช้งาน การติดตั้งระบบ และการตรวจสอบความปลอดภัย เพื่อเป็นข้อแนะนำ ในการทำให้ปฏิบัติงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

3.2.2 นิยาม

ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ หมายถึง ภาชนะที่รับแรงดันไอน้ำ ซึ่งมีการกักเก็บไอน้ำให้มีความดันใช้งานสูงกว่าบรรยากาศปกติ ซึ่งใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมทั่วไป และรวมถึงอุตสาหกรรมบริการเป็นต้น

3.3 วัสดุที่ใช้สร้างภาชนะรับแรงดันไอน้ำ

การสร้างภาชนะรับแรงดันไอน้ำรูปทรงต่าง ๆ นั้น จะต้องดำเนินการเป็นไปตามมาตรฐาน ASME ของอเมริกา, BS ของอังกฤษ, EN ของยุโรป, JIS ของญี่ปุ่น หรือมาตรฐานสากลอื่นที่เทียบเท่า

3.3.1 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำสร้างจากเหล็ก อาทิ A516, SB46 หรือวัสดุอื่นใดที่มีคุณสมบัติเทียบเท่า รวมถึงฝาปิดและกลไกในการล็อกปิดผนึกขณะใช้งาน

3.3.2 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำสร้างจากสแตนเลส อาทิ SUS304 หรือ SUS316 รวมถึงฝาปิดและกลไกในการล็อกปิดผนึกขณะใช้งาน

3.3.3 การปิดผนึกของฝาปิดและภาชนะรับแรงดันไอน้ำอาจยึดด้วยสลักเลื่อน, ฟันเฟือง หรือขอบซ้อนขอบ หรือโบลท์กับนัต อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรือวัสดุที่มีความแข็งแรงเทียบเท่าก็ได้

3.4 พื้นฐานของภาชนะรับแรงดันไอน้ำ

การใช้งานไอน้ำในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เกษษกรรม หรือการฆ่าเชื้อของเครื่องมือทางการแพทย์ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่กักเก็บไอน้ำที่มีความดันสูงกว่าบรรยากาศปกติเพื่อใช้อบหรือการนิ่งผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ให้ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ หรือเชื้อจากของเสียทางชีวภาพ ป้องกันการปนเปื้อน หรือการอบนิ่งฆ่าเชื้อในการบวนการผลิตอาหารกระป๋อง อาทิ อุตสาหกรรมปลากระป๋อง ผักผลไม้กระป๋อง เป็นต้น ภาชนะรับแรงดันไอน้ำที่ใช้อาจออกแบบรูปทรงต่างๆ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น ทรงกระบอกขามีฝาปิดหน้า-หลังขึ้นรูปผิวโค้งเพื่อให้สามารถลดความเค้นจากความดันภายในได้ วัสดุที่ใช้สร้างอาจเป็นชนิดเดียวกัน บางแบบอาจเป็นตู้อบสี่เหลี่ยมฝาเปิดปิดจะถูกออกแบบให้เป็นแผ่นเรียบ โดยมีขอบหนาและมีเหล็กเสริมขอบ (Stag) ให้มีความแข็งแรงปลอดภัยต่อการใช้

งาน การสร้างตัวเรือน ขอบ และฝาปิดผลึก หรืออาจเชื่อมขอบให้รับแรงดึงตามแนวยาวหรือตามแนวเส้นรอบวงก็ได้ ดังรูปที่ 3.1 เป็นหม้ออบฆ่าเชื้อในห้องทดลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 950 mm ยาว 1,180 mm และปริมาตร 885 liters ใช้ทดลองอบฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องตัวอย่าง ก่อนดำเนินการผลิต



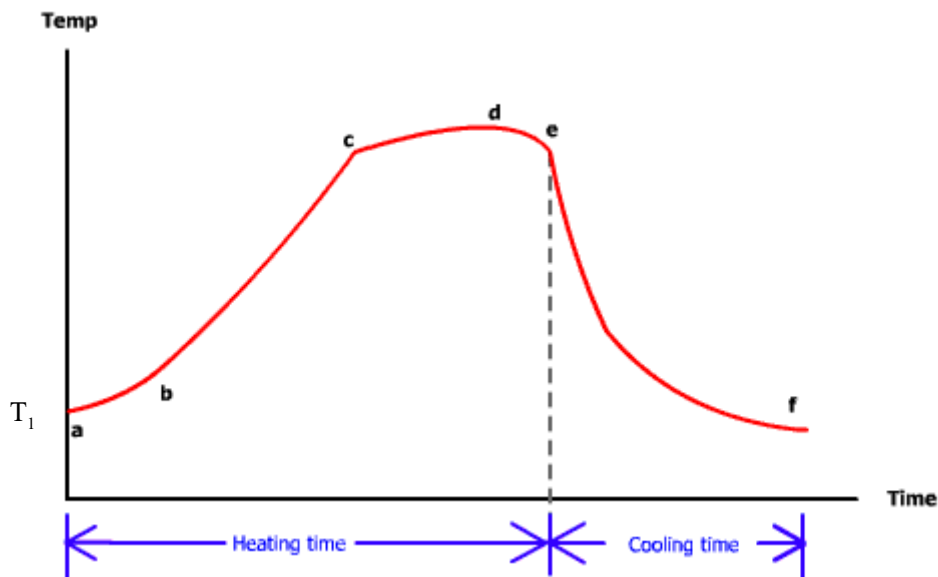
รูปที่ 3.1 หม้ออบฆ่าเชื้อ

3.5 หลักการทำงานของภาชนะรับแรงดันชนิดหม้ออบฆ่าเชื้อ

การอบฆ่าเชื้อของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ ตามปริมาตรหรือจำนวนความจุของภาชนะรับแรงดันไอน้ำโดยการจ่ายไอน้ำที่มีความร้อนและความดันสูงกว่าสภาวะบรรยากาศปกติ เข้าในภาชนะในช่วงเวลาจำกัดช่วงหนึ่งเพื่ออบให้สุกหรือนึ่งฆ่าเชื้อ โดยทั่วไปจะรักษาระดับอุณหภูมิไว้ประมาณ 121°C ความดันไอน้ำ ประมาณ 0.1 MPa ในเวลาประมาณ 15 นาที หากอุณหภูมิและความดันสูงกว่าระดับนี้แล้ว อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้สร้าง เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะแปรตามความดันและอุณหภูมิ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนผิวหรืออาจเกิดสนิมเร็วกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานสั้นลงกว่าเกณฑ์กำหนด ดังนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานเมื่อช่วงเวลาที่หนึ่งจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสภาพทางกายภาพของเปลือกภาชนะ ฝาเปิด-ปิด รวมถึงอุปกรณ์ส่วนประกอบ อาทิ สลักเลื่อน ฟันเฟือง หรือขอบซ้อนที่ปิดผนึก ตรวจสอบระบบการควบคุมไอน้ำเข้า ระบบระบายน้ำกลั่นตัวออกจากตัวภาชนะ สภาพของอุปกรณ์ตรวจสอบการทำงานจำพวก เกจวัดความดัน เทอร์โมมิเตอร์ และอุปกรณ์ความปลอดภัยจำพวก ลิ้นนิรภัย เป็นต้น

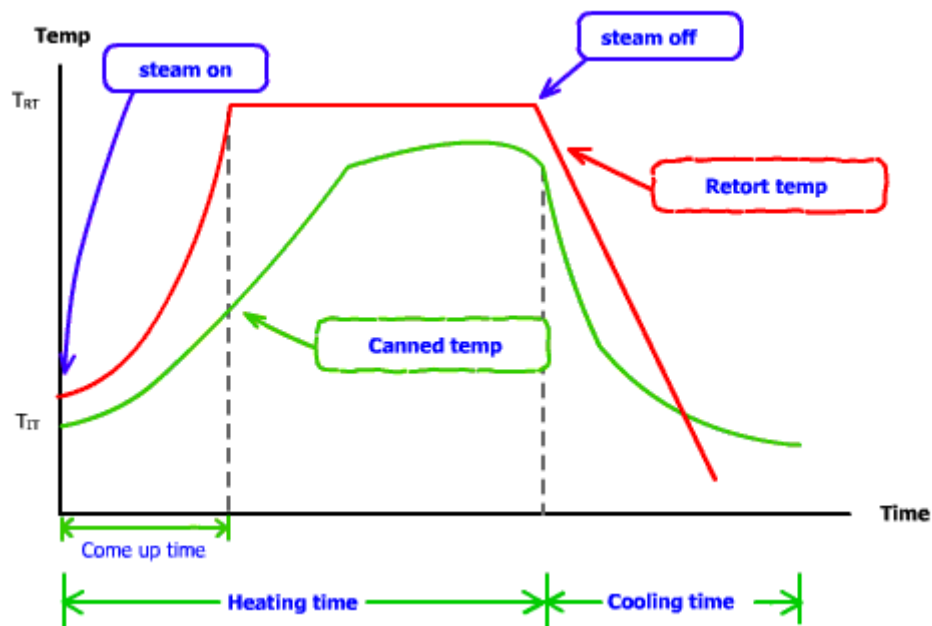
กระบวนการนี้ควรใช้ไอน้ำ อาจอธิบายโดยย่อดังรูปที่ 3.2 เมื่อดำเนินการบรรจุผลิตภัณฑ์และปิดผนึกฝาเรียบร้อยแล้ว ภาชนะรับแรงดันจะมีอุณหภูมิ T_1 จากนั้นเริ่มให้ความร้อนโดยการบรรจุไอน้ำเข้าไปทำให้อุณหภูมิเพิ่ม จากช่วง a ถึง d อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดที่จุด d จากนั้นก็จะทิ้งระยะให้อุณหภูมิลดลงเรื่อยๆจนถึงจุด e ซึ่งเป็นช่วงการให้ความร้อน เมื่อดำเนินการผ่านจุด e ไปยังจุดสุดท้ายคือจุด f แล้ว อุณหภูมิภายในภาชนะรับแรงดันก็จะประมาณเท่ากับจุดเริ่มต้นกระบวนการ ช่วงเวลาจากจุด a ถึงจุด e เรียกว่า heating time และช่วงเวลาจากจุด e ถึงจุด f เรียกว่า cooling time ส่วนระยะเวลาจากจุด a ไปจุด b เรียกว่าช่วง lag phase ผลิตภัณฑ์จะยังไม่ค่อยมีอุณหภูมิสูงมากนัก เนื่องจากจะมีกระบวนการไล่อากาศร่วมด้วย แต่ในช่วง b ไปยัง c อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงจุด d ถือว่าเป็นจุดที่จะเข้าสู่กระบวนการที่จะต้องระบายความร้อน ซึ่งจะใช้เวลาอย่างต่อเนื่องจนถึงจุด f ซึ่งเป็นจุด

สุดท้ายทั้งนี้กระบวนการต่างๆจะแตกต่างกันตามประเภทหรือชนิดของผลิตภัณฑ์ เช่น อาหารจะขึ้นอยู่กับค่าความจุความร้อน และอาจรวมถึงอุณหภูมิน้ำเย็นที่ใช้ระบายความร้อนด้วย



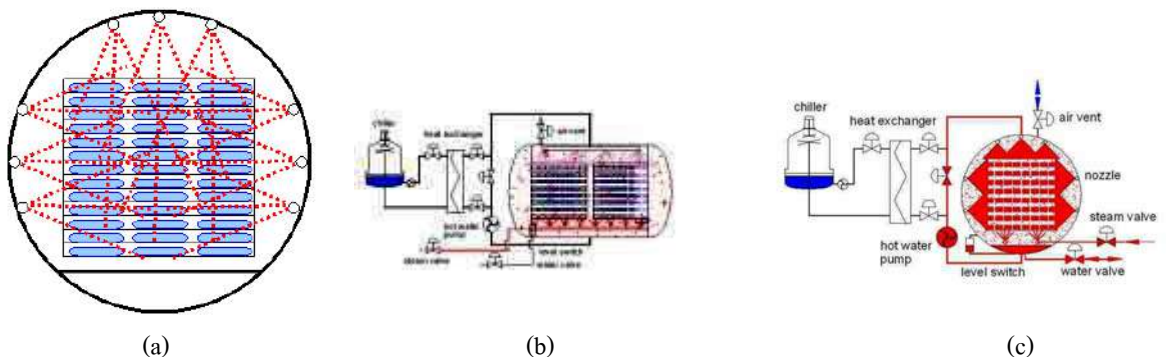
รูปที่ 3.2 กระบวนการทำงานของหม้ออบฆ่าเชื้อ

ตัวอย่างของกระบวนการอบนิ่งและฆ่าเชื้อปลากระป๋อง ในทางปฏิบัติเมื่อนำอาหารกระป๋องไปทำให้ร้อนหรือเย็นโดยทันทีนั้น ไม่อาจดำเนินการได้จริง เนื่องจากอาหารกระป๋องที่เข้ากระบวนการครั้งแรกนั้นมีความดันเท่ากับบรรยากาศ เมื่อปิดผนึกฝาภาชนะแล้ว และเริ่มการจ่ายไอน้ำในช่วงแรกจะเป็นการไล่อากาศออกก่อนเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าจะมีเฉพาะไอน้ำ ดังนั้นผู้ควบคุมภาชนะจะต้องทำการปิดลิ้นระบาย หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในภาชนะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เรียกว่าช่วงเพิ่มเวลา (Come Up Time) ดังรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าอุณหภูมิของกระป๋องจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเส้นบาง ส่วนการรักษาอุณหภูมิที่ต้องการ (T_{RT}) นั้นจะควบคุมความดันของไอน้ำให้คงที่ จนกระทั่งเปิดวาล์วระบายไอน้ำออกจึงจะทำให้อุณหภูมิภายในภาชนะค่อยๆลดลง ส่วนอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์หรือกระป๋องนั้นจะเหมือนกระบวนการในรูปที่ 3.2 ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เวลาช่วงแรกประมาณ 10 นาที เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.3 การกระจายอุณหภูมิในภาชนะและอุณหภูมิของอาหารกระป๋อง

ตัวอย่างกระบวนการอบฆ่าเชื้อแบบเปียกด้วยระบบการฉีดพ่นไอน้ำเป็นระยะๆตาม รูปที่ 3.4 ซึ่งระบบจะมีอุปกรณ์ประกอบ คือ ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนและน้ำเย็น โดยก่อนเริ่มกระบวนการจากการอุ่นภาชนะและการเปิด-ปิดภาชนะ ช่วงต่างๆ ตามกำหนดในกระบวนการจะให้ความร้อนที่ความดันสูงๆ เมื่อเสร็จกระบวนการแล้วจะลดอุณหภูมิ โดยระบบการทำมาเย็นด้วยน้ำ มีลำดับการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.4 (a), (b) และ (c) หลักการทำงานของภาชนะรับแรงดันที่ใช้ออบฆ่าเชื้อ

ก่อนเริ่มกระบวนการอบฆ่าเชื้อ จะต้องอุ่นภาชนะก่อนโดยให้น้ำผ่านจนกระทั่งอุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการแล้วทำบรรจผลผลิตกันตามความจุของภาชนะบนตะแกรง และทำการปิดผนึกภาชนะ จากนั้นจะป้อนน้ำร้อนให้ผ่านเข้าไปโดยปั๊มซึ่งจะถูกควบคุมระดับโดยอัตโนมัติ ทำให้เกิดการหมุนเวียน จากนั้นไอน้ำจะถูกป้อนผ่านเข้าไปในภาชนะพร้อมกับการเป่าอากาศซึ่งมีความดันสูงเข้าไปในภาชนะจนความดันภายในภาชนะสูงขึ้นถึงจุดกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ นั้น ส่วนใหญ่อุณหภูมิกระบวนการนี้จะกำหนดช่วงระหว่าง 3 – 15 °C ต่อ นาที จากนั้นของเหลวที่อยู่ภายในภาชนะจะถูกปั๊มให้หมุนเวียน โดยผ่านหัวฉีดรอบๆเปลือกภาชนะนั้น ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในภาชนะจะถูกรักษาให้คงที่และการกระจายตัวของละอองน้ำ ในกระบวนการดังกล่าวจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์คงที่ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้ว

ระบบจะปิดไอน้ำและเริ่มการลดอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ น้ำร้อนในภาชนะจะถูกส่งไประบบความร้อนจากหอยเชลล์ โดยน้ำที่ผ่านการระบายความร้อนแล้วจะถูกนำกลับมาใช้ซ้ำอีกครั้ง โดยปกติแล้วการลดสุดท้ายของผลิตภัณฑ์นั้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศแวดล้อมโดยประมาณ 15°C และไม่ควรสูงกว่า 60°C ซึ่งอาจทำให้ผลผลิตเสียหายได้

ข้อสังเกต กระบวนการอบฆ่าเชื้อแบบเปียกนี้จะใช้ไอน้ำป้อนเป็นระยะๆ การจ่ายไอน้ำจากท่อประธานเพื่อเข้าอุปกรณ์ลดความดัน ควรมีความดันเกินกว่า 0.6 MPa สำหรับอากาศซึ่งใช้ในการเป่า ควรจะมีความดันไม่ต่ำกว่า 0.5 0 MPa เพื่อรักษาปริมาณอากาศให้คงที่ เพราะหากไม่เพียงพออาจทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพได้

3.6 ชนิดของภาชนะรับแรงดันไอน้ำ

ภาชนะรับแรงดันไอน้ำมีหลากหลายชนิดหลายแบบ ซึ่งอาจแบ่งตามการใช้งานปกติ เช่น การเปิดปิดฝา ภาชนะ อาทิ แบบเปิดด้านหน้า (Front Open) แบบเปิดด้านบน (Top Open) หรืออาจแบ่งตามกระบวนการทำงาน เช่น ลักษณะการทำงานอยู่กับที่ (Static Vessels) มีการใช้ไอน้ำทั้งที่ หรือการฉีดพ่นเป็นระยะๆ หรืออาจเป็นแบบหมุนหรือเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ (Dynamic vessels) บ้างครั้งอาจมีการทำสุญญากาศก่อนเริ่มการฉีดพ่นไอน้ำตลอดช่วงการทำงานหรืออาจเป็นแบบฉีดพ่นเป็นระยะๆก็ได้ ดังรายละเอียด

3.6.1 หม้ออบหรือตู้ึ่ง

ลักษณะทรงตู้สี่เหลี่ยมเปิดปิดได้ 2 ด้าน หรือเพียงด้านเดียว ดังรูปที่ 3.5 เป็นตู้ึ่ง-อบอาหาร โดยออกแบบให้มีอุณหภูมิประมาณ $105 - 110^{\circ}\text{C}$ อาหารหรือผลิตภัณฑ์จะถูกบรรจุผ่านตะแกรงและมีล้อเลื่อนเข้า-ออกจากตู้ ซึ่งชุดควบคุมการเปิด-ปิดและควบคุมอุณหภูมิจะทำงานอัตโนมัติ เพื่อให้อาหารหรือผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตามต้องการ

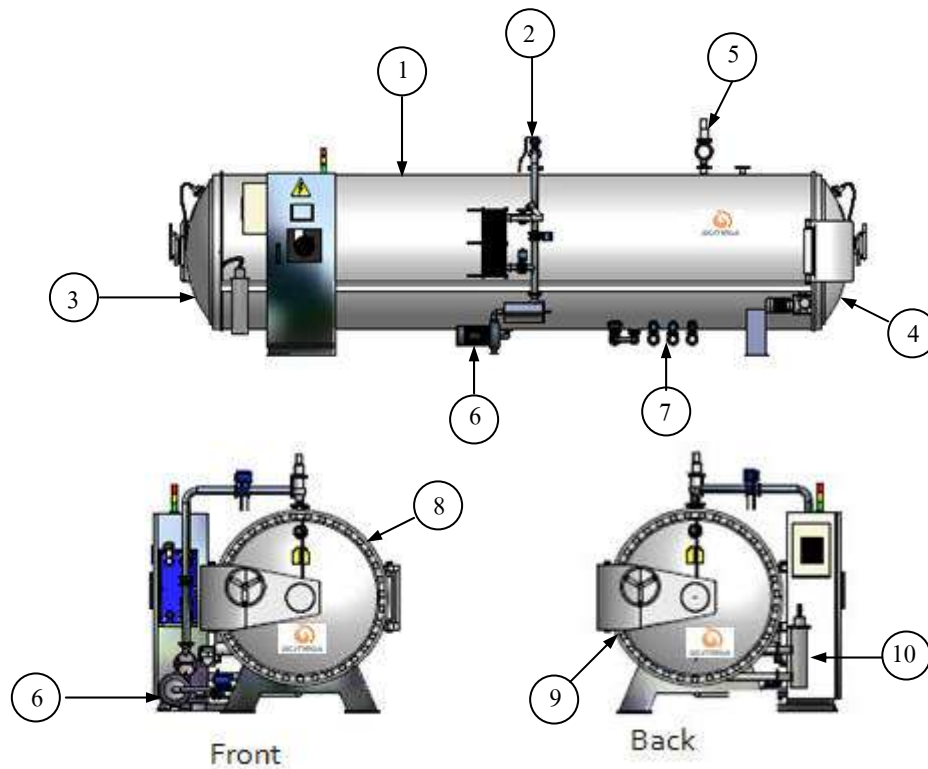


รูปที่ 3.5 ตู้ึ่ง-อบอาหารแบบเปิด-ปิดด้านหน้า

3.6.2 หม้ออบไอน้ำแบบอยู่กับที่ (Static Retort)

เป็นหม้ออบไอน้ำที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตที่มีการอบฆ่าเชื้อมากที่สุด โดยมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.6 ลักษณะด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้างโดยรวมแล้วจะมีโครงสร้างคร่าวๆดังนี้ คือ เรือนภาชนะทรงกระบอก หมายเลข (1) เปิด-ปิดฉีกด้วยฝาปิดหน้า-หลังหมายเลข (3), (4) ซึ่งฝาปิดจะยึดด้วยขอบซ้อน หมายเลข (8) ไอน้ำจ่ายเข้าที่ท่อไอน้ำ หมายเลข(2) ส่วนน้ำป้อนผ่านปั๊มหมุนเวียนหมายเลข (6) การควบคุม

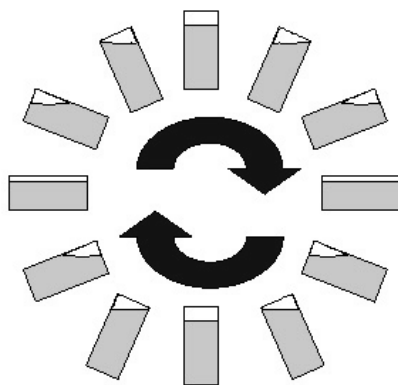
การทำงานผ่านชุดควบคุมหมายเลข (10) ภาชนะรับแรงดันจะต้องติดตั้งลิ้นนิรภัย หมายเลข(5) ให้สอดคล้องกับ ความดันใช้งาน เพื่อป้องกันความเสียหายของโครงสร้างจากความดันสูงเกินความดันใช้งานปกติ ส่วนการ ระบายน้ำกลั่นตัวจะระบายผ่านท่อ หมายเลข(7) เมื่อดำเนินกระบวนการอบฆ่าเชื้อแล้ว สามารถเปิดฉีกฝาส่วน หน้า-หลัง โดยการเลื่อนขอบ (Stag) หมายเลข(9) ออกได้สะดวก ส่วนอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญจะ จำเป็นต้องติดตั้ง อาทิ เกจวัดความดัน วาล์วได้อากาศขณะอุ่นภาชนะก่อนบรรจุผลิตภัณฑ์ เป็นต้น



รูปที่ 3.6 หม้ออบไอน้ำแบบอยู่กับที่

3.6.3 หม้ออบฆ่าเชื้อแบบหมุน (Rotary Retort)

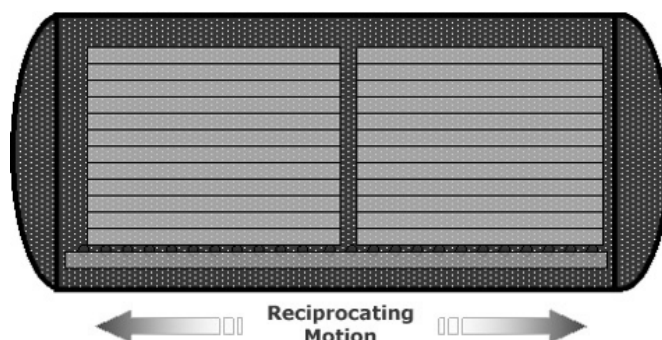
หม้ออบฆ่าเชื้อซึ่งเป็นภาชนะรับแรงดันไอน้ำแบบหมุนนี้ เป็นภาชนะรับแรงดันไอน้ำแบบหนึ่ง การทำงาน จะมีกลไกให้ภาชนะเกิดการหมุน เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์แบบกระป๋องและผลิตภัณฑ์บรรจุขวดแก้ว ความเร็ว ในการหมุนโดยประมาณ 10 รอบต่อนาที ดังนั้นตะแกรงที่บรรจุผลิตภัณฑ์ก็ต้องออกแบบให้มีความแข็งแรง ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดความเร็วประมาณ 2 – 25 รอบต่อนาที ข้อดีคือเกิดการผสมระหว่างของร้อนและเย็นได้ ดีกว่าและใช้เวลาสั้นกว่าประมาณ ร้อยละ 60 ของการอบโดยภาชนะรับแรงดันไอน้ำแบบอยู่กับที่ มีหลักการทำงาน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หลักการทำงานของหม้ออบมาเชื้อแบบหมุน

3.6.4 หม้ออบมาเชื้อแบบเขย่า (Reciprocating Retort)

สำหรับหม้ออบมาเชื้อแบบเขย่าจะใช้ข้อผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับหม้ออบมาเชื้อแบบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว แต่การทำงานของหม้ออบนี้ ผลิตภัณฑ์จะถูกเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาในภาชนะขณะการทำงานปกติ ด้วยการกำหนดจากชุดควบคุมความเร็วการเขย่าทั้งนี้ เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างไอน้ำกับน้ำได้เต็มที่ มีความเร็วประมาณ 0 – 60 ครั้งต่อนาที และจะใช้เวลาสั้นกว่าแบบอื่นๆ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 หลักการทำงานของหม้ออบไอน้ำแบบเขย่า

3.7 การตรวจสภาพประจำปี

การใช้งานภาชนะรับแรงดันไอน้ำ ซึ่งทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงและดำสลับกันไปมา วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างจะเกิดการล้าตัว ดังนั้นเมื่อมีการใช้งาน ในช่วงระยะเวลา 1 ปี ควรได้รับการตรวจสอบสภาพความแข็งแรง ของโครงสร้าง กลไกการเปิด-ปิด ตลอดจนอุปกรณ์ส่วนประกอบต่างๆ ประจำปี เพื่อความมั่นใจในการใช้งาน รายการตรวจสอบดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นขอบเขตและวิธีการตรวจสอบประจำปี โดยจะแบ่งเป็นส่วนของภาชนะรับแรงดัน ส่วนประกอบ และอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ

ตารางที่ 3.1 ข้อเสนอแนะ ขอบเขตและวิธีการตรวจสอบประจำปีสำหรับภาชนะรับแรงดัน

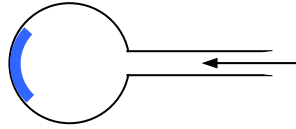
1) ตัวภาชนะรับแรงดันไอน้ำ (รวมถึงชิ้นส่วนต่างๆ จนถึงวาล์วเปิดปิดตัวแรก (First Stop Valve))			
ประเภท \ รายการ	รายการที่ต้องถูกตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	หมายเหตุ
ตรวจสอบ	เปลือก (Shell) แผ่นปิดหัว (Head Plate) แผ่นปิดท้าย (Bottom plate) แผ่นปิดหลอดเครื่อง (Tube plate) แผ่นครอบ (Cover Plate) และ แผ่นค้ำจุน (Stays) รวมถึงอุปกรณ์ภายใน	- ตรวจสอบผิวภายในและภายนอกด้วยสายตา - ตรวจสอบการทดสอบด้วยแรงดันน้ำ (Hydrostatic Test) ถ้าจำเป็น	
ตรวจสอบ	สลักเกลียว (Bolt) และ เป็นเกลียว (Nut) ของ แผ่นปิดคลัทช์ (Clutch) แท่งแผ่รังสี (Radiation Type Bars) สำหรับปิดอุปกรณ์ (ถ้ามี)	ตรวจสอบด้วยสายตา	ทดสอบการทำงานถ้าจำเป็น
ตรวจสอบ	หลอดให้ความร้อน (Heating Tube)	ตรวจสอบด้วยสายตา	
ตรวจสอบ	ช่องเปิดเพื่อทำความสะอาดเครื่องและ ตรวจสอบเครื่อง	ตรวจสอบด้วยสายตา	
คำแนะนำ	สภาพการติดตั้ง กรอบ และฉนวน (Casing and Insulation)	ตรวจสอบด้วยสายตา	

2) ส่วนประกอบของภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessel Fittings)			
ประเภท \ รายการ	รายการที่ต้องถูกตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	หมายเหตุ
ตรวจสอบ	วาล์วนิรภัย (Safety Valve) และวาล์วลดความดัน (Relief Valve)	ตรวจสอบด้วยสายตา ภายหลังการแยกส่วน และการปรับปรุง	ถ้าโรงงานผู้ผลิตวาล์วได้ปรับแต่งวาล์วแล้ว ตรวจสอบสภาพภายนอกเพียงอย่างเดียว
ตรวจสอบ	อุปกรณ์นิรภัยอื่นๆ	ตรวจสอบภายนอกและตรวจสอบด้วยสายตา	

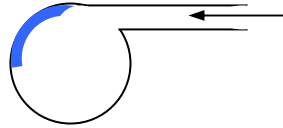
2) ส่วนประกอบของภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessel Fittings)			
ประเภท	รายการที่ต้องถูกตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	หมายเหตุ
ตรวจสอบ	ท่อระบาย (Water relief Pipe)	ตรวจสอบสภาพภายนอกด้วยสายตา	
ตรวจสอบ	เกจความดัน (Pressure gauge) เครื่องวัดความดัน (Manometer) และ เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)	ตรวจสอบด้วยสายตา	ถอดออกถ้าจำเป็น
ตรวจสอบ	วาล์วเปิดปิดประเภทต่างๆ	ตรวจสอบภายนอก	วาล์วต้องถูกติดตั้งอยู่กับตัวเครื่อง
คำแนะนำ	ระบบล็อกภายใน (Interlock)	ตรวจสอบภายนอก	ทดสอบการทำงานถ้าจำเป็น
ตรวจสอบ	เกจวัดระดับของเหลว (Liquid Level Gauge)	ตรวจสอบภายนอก	

หากมีความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบเพิ่มเติมนอกเหนือจากคำแนะนำแล้วควรดำเนินการดังนี้

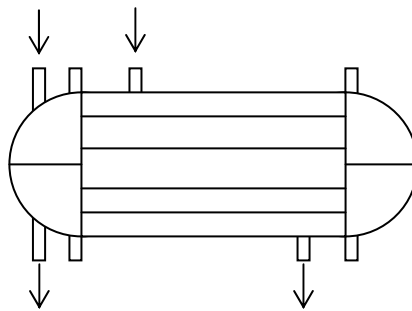
- a) ตรวจสอบการกัดกร่อนและการลุกลามในชิ้นส่วน
- b) ในกรณีที่ถังมีเครื่องกวน ต้องตรวจสอบร่องรอยการเสื่อมสภาพที่จุดสัมผัส (Contact Part) และการเสื่อมสภาพโดยชิ้นส่วนอื่นๆเอง
- c) ตรวจสอบความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของอุณหภูมิบนภาชนะรับแรงดันซึ่งถูกให้ความร้อนและลดอุณหภูมิซ้ำกันหลายรอบ
- d) ตรวจสอบการผิครูปบนภาชนะรับแรงดันที่ผลิตจากแผ่นเหล็กไร้สนิมบาง (Thin Stainless Steel Plate)
- e) ตรวจสอบรอยแตกร้าวที่จุดเชื่อมและส่วนอื่นบนภาชนะรับแรงดันที่ผลิตจากเหล็กชนิดพิเศษ เช่น เหล็กไร้สนิมหรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Metal)
- f) สำหรับภาชนะรับแรงดันแบบผนังสองชั้น ต้องตรวจสอบดังนี้
 1. การผิครูปทั้งภายในและภายนอกเปลือก (Shell)
 2. รอยแตกร้าวและการรั่วซึมที่มุมภายนอกเปลือก
- g) ในกรณีที่ภาชนะรับแรงดันมีชั้นด้านใน (Lining) ต้องตรวจสอบความเสียหายที่ชั้นด้านในด้วย
- h) ตรวจสอบความเสียหายส่วนที่รองรับตัวถัง และร่องรอยการเสื่อมสภาพของพื้นผิวด้านในของถังแบบหมุน (Rotary Type Vessel)
- i) ตรวจสอบความเสียหายที่บริเวณใกล้เคียงกับรูนไอน้ำภายในท่อ
- j) ตรวจสอบการกัดกร่อนดังจุดต่อไปนี้ตามรูปที่ 3.6-3.8



รูปที่ 3.9 การกัดกร่อนด้านข้างถึง



รูปที่ 3.10 การกัดกร่อนด้านบนถึง



รูปที่ 3.11 การกัดกร่อนที่แผ่นปิดหัวและหลอด

- k) สำหรับภาชนะรับแรงดันทรงสูง (Tower) ต้องตรวจสอบรายการต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ
1. หลุมบนพื้นผิวภายในของแผ่นปิดท้าย
 2. การผุกร่อนจากกรด เช่น H_2S , SO_2 และอื่นๆบนพื้นผิวภายในของแผ่นปิดหัว (Head Plate)
- l) ในกรณีที่ฝาครอบของภาชนะรับแรงดันถูกถอดออกบ่อยครั้งระหว่างการดูแลรักษา ต้องตรวจสอบสิ่งต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ
1. การผิดรูปและการเสื่อมสภาพที่หน้าแปลนของฝาครอบ
 2. ความเสียหายที่สลักเกลียว เป็นสลักเกลียว สลัก แหวนรอง และอื่นๆ
 3. ตรวจสอบความผิดปกติและสภาพของตัวรัดช่วยพุง (Clamping Crutch)
 4. ตรวจสอบการผิดรูปและการทำงานที่ผิดปกติของปลายแขนของตัวรัดช่วยพุงแบบ Clamping Radiant Arms

3.8 การตรวจสอบความปลอดภัย

การตรวจสอบความปลอดภัยภาชนะรับแรงดันไอน้ำจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนด 1.2.1, 1.2.2 และ 1.2.6 โดยต้องมีรายละเอียดของวิศวกรผู้ตรวจสอบ ซึ่งดำเนินการตามหลักวิชาการวิศวกรรม เพื่อให้ภาชนะรับแรงดันไอน้ำนั้นสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย พร้อมรายงานรายการตรวจวัด ประกอบด้วย รูปทรงและรายละเอียดการเปิดปิดภาชนะรับแรงดัน สภาพอุปกรณ์ความปลอดภัย อาทิ ลิ้นนิรภัย ลิ้นลดความดันไอน้ำ ระบบการระบายไอน้ำหรือน้ำที่กลั่นตัว พร้อมด้วย สภาพของอุปกรณ์ประกอบเหล่านั้น สำหรับแบบรายงานการตรวจสอบอาจใช้แบบรายงานความปลอดภัยในการใช้หม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันไอน้ำ ดังเอกสารตัวอย่าง

ตัวอย่าง

แบบรายงานการตรวจรับรองความปลอดภัยในการใช้หม้ออบไอน้ำ หรือภาชนะรับแรงดันจากไอน้ำ

ข้าพเจ้า.....อายุ.....ปี อาชีพ.....
 พักอยู่บ้านเลขที่.....หมู่.....ตรอก/ซอย.....ถนน.....
 ตำบล/แขวง.....อำเภอ/เขต.....จังหวัด.....โทรศัพท์.....
 สถานที่ทำงาน.....เลขที่.....หมู่.....
 ตรอก/ซอย.....ถนน.....ตำบล/แขวง.....
 อำเภอ/เขต.....จังหวัด.....โทรศัพท์.....
 ได้รับอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ตามพระราชบัญญัติวิชาชีพวิศวกรรม พ.ศ. 2505 / พระราชบัญญัติวิศวกร พ.ศ.2542 เลขทะเบียน สก/วก/พก.....ตั้งแต่วันที่.....
 ถึงวันที่.....และไม่อยู่ในระหว่างถูกสั่งพักหรือเพิกถอนใบอนุญาตฯ ตามสำเนาบัตรประจำตัวที่แนบมา
 พร้อมนี้ ได้รับอนุญาตให้ขึ้นทะเบียนเป็นวิศวกรตรวจสอบหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันของ.....
 เลขทะเบียน.....หมดอายุวันที่.....
 ข้าพเจ้าได้ทำการตรวจสอบหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันของโรงงาน / บริษัท.....
 ชื่อตั้งอยู่เลขที่.....หมู่.....ตรอก/ซอย.....ถนน.....
 ตำบล/แขวง.....อำเภอ/เขต.....จังหวัด.....โทรศัพท์.....
 ประกอบกิจการ.....ทะเบียนโรงงานเลขที่.....หมดอายุ 31 ธันวาคม.....
 ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานชื่อ.....จำนวนคนงาน.....คน
 ตรวจทดสอบเรียบร้อยเมื่อวันที่.....เวลา.....น. โรงงานนี้มีหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับ
 แรงดัน ทั้งหมด.....เครื่องหม้ออบไอน้ำ เครื่องนี้หมายเลข.....ขณะตรวจหม้ออบไอน้ำหรือ
 ภาชนะรับแรงดันชุดอื่นอยู่ในสภาพ ☐ กำลังใช้งาน ☐ หยุด

ข้าพเจ้าได้ตรวจหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันเครื่องนี้ ตามหลักวิศวกรรมแล้ว ขอรับรองว่าหม้ออบไอน้ำ
 หรือภาชนะรับแรงดัน และอุปกรณ์ทุกส่วนของหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดัน เป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงไว้ใน
 เอกสารนี้ และหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันเครื่องนี้สามารถใช้งานได้โดยปลอดภัย ทั้งนี้ ต้องมีการใช้งานอย่างถูกวิธี
 และมีการบำรุงรักษา ซ่อมแซม ตามคำแนะนำของวิศวกรโดยเคร่งครัด ข้าพเจ้าจึงลงลายมือชื่อไว้เป็นหลักฐาน

(ลงชื่อ).....
 (.....)

วิศวกรผู้ตรวจสอบ

(ลงชื่อ).....
 (.....)

(ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงาน)

หม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดัน หมายเลข.....ติดตั้งเมื่อปี.....สร้างโดย.....
 ผู้ควบคุมการใช้งานชื่อ.....เลขทะเบียน.....หมดอายุ พ.ศ.....
 ผู้ควบคุมการใช้งานชื่อ.....เลขทะเบียน.....หมดอายุ พ.ศ.....

1 ลักษณะการใช้งาน

- ☐ อุปกรณ์ไอน้ำ ☐ อุปกรณ์ฆ่าเชื้อ
☐ อุปกรณ์เคมีภัณฑ์ ☐ อื่นๆ

2 ตัวหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดัน

- 2.1 โครงสร้างของหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดัน ☐ ทรงกระบอก ☐ ผู้สี่เหลี่ยม
☐ อื่นๆ ขนาด ความหนา
- 2.2 ฉนวนกันความร้อน ☐ มี ☐ ไม่มี
สภาพฉนวน ☐ ดี ☐ ไม่ดี ☐ ควรปรับปรุง
- 2.3 ลักษณะฝาหรือผนังหน้า-หลัง ☐ โค้ง ☐ ขอบโค้ง ☐ แผ่นเรียบ
ความหนา Stay เสริมฝา มี ☐ ไม่มี ☐
- 2.4 ขอบฝา ☐ ขึ้นรูปเป็นแผ่นเดียวกับฝา
☐ เชื่อมต่อ ขอบกว้าง หนา
- 2.5 วิธีปิดผนึกฝากับตัวหม้อไอน้ำ หรือภาชนะรับแรงดันฯ
☐ ยึดด้วย Bolt & Nut ขนาด Bolt Ø สก๊อตขนาด Ø จำนวน ชุด
สภาพ ☐ แข็งแรง ☐ ควรปรับปรุง
☐ สลักเลื่อนตามแนวรัศมี ขนาด จำนวน ชุด
สภาพ ☐ แข็งแรง ☐ ควรปรับปรุง
☐ แบบพันเฟือง หรือขอบซ้อนขอบ จำนวน ชุด
สภาพ ☐ แข็งแรง ☐ ควรปรับปรุง
- 2.6 วาล์วและท่อไอน้ำ ขนาด Ø วาล์วไอน้ำ Ø
- 2.7 ระบายคอนเดนเสดด้วย ☐ วาล์ว ขนาด ☐ อื่นๆ

3 สภาพอุปกรณ์ของหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันฯ

- 3.1 ลิ้นนิรภัย (Safety Valve) มีจำนวน ชุด เป็นแบบ
☐ แบบถ่วงน้ำหนัก ขนาด Ø ระบายไอน้ำที่ความดัน
☐ แบบสปริงมีคานัด ขนาด Ø ระบายไอน้ำที่ความดัน
☐ แบบ ขนาด Ø ระบายไอน้ำที่ความดัน
- 3.2 สภาพทางกายภาพ ☐ เรียบร้อย ☐ ไม่เรียบร้อย ☐ ควรปรับปรุง
- 3.3 ระบบความดันไอน้ำ
- 3.3.1 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) มีจำนวน ชุด สเกลสูงสุดอ่านได้
- 3.3.2 ความดันใช้งานสูงสุด ความดันใช้งานปกติ
- 3.3.3 อุณหภูมิใช้งานสูงสุด อุณหภูมิใช้งานปกติ
- 3.3.4 ความดันสูงสุดจากหม้อไอน้ำ

4 สภาพอุปกรณ์ส่วนควบ

- 4.1 อุปกรณ์ / ลิ้นปรับลดความดัน
☐ แบบทางกล ☐ แบบแม่เหล็ก ☐ ใช้มือปรับ สภาพ ☐ ดี ☐ ควรปรับปรุง

- 4.2 อุปกรณ์รางเลื่อน ☐ มี ☐ ไม่มี สภาพ ☐ ดี ☐ ควรปรับปรุง
- 4.3 หัวฉีดไอน้ำ/ น้ำ ☐ มี ☐ ไม่มี สภาพ ☐ แข็งแรง ☐ ควรปรับปรุง
- 4.4 ก้านค้ำไอน้ำ ☐ มี จำนวน ชุด ☐ ไม่มี ☐ ควรปรับปรุง
- 4.5 ฐานรองรับ สภาพ ☐ แข็งแรง ☐ ควรปรับปรุง

5 สภาพการกักครอบ

- 5.1 ภายใน ☐ ไม่มี ☐ มีน้อย ☐ มีมาก ควรปรับปรุง
- 5.2 ภายนอก ☐ ไม่มี ☐ มีน้อย ☐ มีมาก ควรปรับปรุง

รายงานผลการตรวจหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดัน ก่อนรับรอง

- | | | |
|---|------------------------------------|----------------------------------|
| ตัวหม้ออบไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดัน | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ฉนวนหุ้ม | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ฝาปิดหรือผนังหน้า-หลัง | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ช่องคนลอด / ช่องมือลอด | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| เสริมฝา (stay) | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| สลักยึด | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| โบลท์ / นัท ยึด(Bolt & Nut) | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| สลักเลื่อนตามแนวรัศมี | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ฟืนเฟือง และขอบซ้อนขอบ | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ปะเก็นฝาปิด | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| เกจวัดอุณหภูมิ | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| เกจวัดความดัน | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ลิ้นนิรภัย | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| ลิ้นลดความดัน | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| วาล์วและท่อไอเข้า | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| การระบายคอนเดนเสด | ☐ เรียบร้อย | ☐ บกพร่อง |
| รายละเอียดของส่วนที่บกพร่อง และอื่นๆ..... | | |
| | | |
| | | |

ได้ดำเนินการซ่อมแซมแก้ไขเป็นที่เรียบร้อยสมบูรณ์ก่อนลงลายมือชื่อรับรองแล้ว

ลงชื่อ

(.....)

(วิศวกรผู้ตรวจสอบ)

3.9 เอกสารอ้างอิง

- 3.9.1 กฎกระทรวง กำหนด มาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำและหม้อต้มและภาชนะรับแรงดันในโรงงานที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549
- 3.9.2 [http://www.acmega.co.th/thai/Knowing%20Retort%20\(Thais\).htm](http://www.acmega.co.th/thai/Knowing%20Retort%20(Thais).htm)
- 3.9.3 <http://www.batch-retort.com/autoclave-sterilizer-den-02.htm>
- 3.9.4 http://pirun.ku.ac.th/~g4765306/thermal_proc/formula_method.htm
- 3.9.5 ASME Code section 2001

หน่วยที่ 4 การออกแบบติดตั้งระบบท่อไอน้ำ

ในการพิจารณาออกแบบระบบท่อไอน้ำ เพื่อนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำหรือถังพักไอน้ำ (Steam Header) ไปยังอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ จำเป็นต้องพิจารณาขนาดท่อให้เหมาะสม โดยพิจารณาเทอมต่างๆ เพื่อป้องกันการสูญเสียความดันผ่าน ท่อประจัน ท่อแยก ข้อต่อ และวาล์วไอน้ำต่างๆ เพื่อให้ระบบมีความสมบูรณ์และประหยัดพลังงานเป็นสำคัญ

4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบติดตั้งระบบท่อไอน้ำ ให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย ประหยัดและมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2 ขอบเขตและนิยาม

4.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะงานระบบท่อไอน้ำซึ่งเป็นการออกแบบหาขนาดการติดตั้ง การเลือกอุปกรณ์ประกอบเพื่อให้ข้อแนะนำในการเลือกวัสดุท่อ เพื่อให้เหมาะสมกับงาน โดยเป็นและเกิดประโยชน์สูงสุด

4.2.2 นิยาม

การออกแบบติดตั้งระบบท่อไอน้ำ หมายถึง การเลือกใช้วัสดุของ ท่อ ข้อต่อ และวาล์ว การกำหนดขนาดท่อ เทคนิคการติดตั้ง ท่อไอน้ำและท่อน้ำกลั่นตัว ในระบบไอน้ำทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม และในอาคารเช่น โรงแรมหรือโรงพยาบาล เป็นต้น

4.3 วัสดุท่อ ข้อต่อและวาล์ว

การเลือกวัสดุท่อ ข้อต่อ และวาล์วในระบบควรใช้

- 4.3.1 มาตรฐานท่อในระบบไอน้ำ ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้มาตรฐาน ASME, API, ANSI ของอเมริกา, BS ของอังกฤษ, DIN ของยุโรป, JIS ของญี่ปุ่น หรืออื่นใดที่เป็นมาตรฐานสากล
- 4.3.2 มาตรฐาน ASME, ASTM, API, ANSI เป็นมาตรฐานท่อที่มีของครบถ้วนในท้องตลาดและใช้งานแพร่หลาย เป็นส่วนใหญ่ในประเทศไทย
- 4.3.3 ท่อไอน้ำควรเป็นท่อเหล็กคาร์บอนดำ และการต่อท่อทำโดยวิธีการเชื่อมไฟฟ้า
- 4.3.4 สำหรับท่อที่ใช้งานที่ความดันต่ำกว่า 0.1 MPa : อาจจะใช้การเชื่อมต่อท่อแบบเกลียวได้ โดยเฉพาะท่อที่มีขนาดเล็กกว่า 50 mm

ตารางที่ 4.1 ความดันอนุญาตสูงสุดของท่อ ASTM แต่ละเกรดที่ต่อท่อแบบเกลียวความหนาเบอร์ 40 (Sch.40)

ASTM Schedule 40 Steel Pipe				
Nominal Pipe Size	Grade			
	A-53B			
	A-106B		A-53B	
	Type : Seamless		Type : ERW	
mm (in)	SE : (psi)	SE : (MPa)	SE : (psi)	SE : (MPa)
	18000	124.02	15360	105.83
15 (1/2)	2222	15.31	1896	13.06
20 (3/4)	1915	13.19	1634	11.26
25 (1)	1736	11.96	1482	10.21
30 (1 1/4)	1528	10.53	1304	8.99
35 (1 1/2)	1429	9.85	1220	8.41
50 (2)	1280	8.82	1093	7.53
65 (2 1/2)	1290	8.89	1100	7.58
80 (3)	1193	8.22	1018	7.01
100 (4)	1096	7.55	935	6.44
125 (5)	1022	7.04	872	6.01
150 (6)	978	6.74	834	5.75
200 (8)	926	6.38	790	5.44

ERW (Electrical Resistance Welding) หมายถึง ท่อมีตะเข็บ

Seamless หมายถึง ท่อไม่มีตะเข็บ

SE หมายถึง Strange Endurance

- 4.3.5 สำหรับท่อน้ำไอกลั่นตัว สามารถใช้ท่อเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Steel Pipe) ได้ แต่ห้ามเชื่อมต่อท่อด้วยการเชื่อมไฟฟ้า ควรจะใช้การเชื่อมต่อท่อแบบเกลียวเท่านั้น
- 4.3.6 การใช้วาล์วเหล็กหล่อในระบบท่อไอน้ำ ควรใช้ด้วยความระมัดระวัง และต้องมีการตรวจสอบอยู่เสมอเนื่องจากมีประวัติแตกระเบิดในขณะใช้งาน
- 4.3.7 ระบบคุณสมบัติวัสดุของท่อ วาล์วและข้อต่อของท่อตามมาตรฐาน ASME, API, ANSI แสดงในตารางที่ 4.2 ระบบคุณสมบัติท่อและข้อต่อท่อ ตามมาตรฐานวัสดุ ASTM

ตารางที่ 4.2 วัสดุท่อและข้อต่อท่อตามมาตรฐาน ASTM

Pipe	Weld Fitting	Screwed & Socket Fitting	Flanges	Valve
A-53	A-234 WPB	A-105	A-105	B62, A-105
API-5L	A-234 WPB	A-105	A-105	B62, A-105
A-106B	A-234 WPB	A-105	A-105 A-181 Gr.1, 2	A-105 A-216 WCB
A-335-P11	A-234 WP11	A-182-F11	A-182-F11	A-182-F11 A-217 WC6

4.4 การกำหนดขนาดท่อไอน้ำและท่อน้ำกลั่นตัว

4.4.1 การกำหนดของขนาดของท่อไอน้ำอ้อมตัว

- 4.4.1.1 การกำหนดของขนาดของท่อไอน้ำอ้อมตัว กำหนดขนาดจากความเร็วของไอน้ำที่ไหลในท่อระหว่าง 15 – 40 m/s
- 4.4.1.2 ความเร็วของไอน้ำอ้อมตัวที่ไหลในท่อที่เหมาะสมควรมีความเร็ว 25 m/s
- 4.4.1.3 การกำหนดของขนาดของท่อไอน้ำขดขึง กำหนดขนาดจากความเร็วของไอน้ำที่ไหลในท่อระหว่าง 50 – 100 m/s
- 4.4.1.4 การคำนวณหาขนาดท่อไอน้ำ

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{m}s}{\pi v}} \quad (4-1)$$

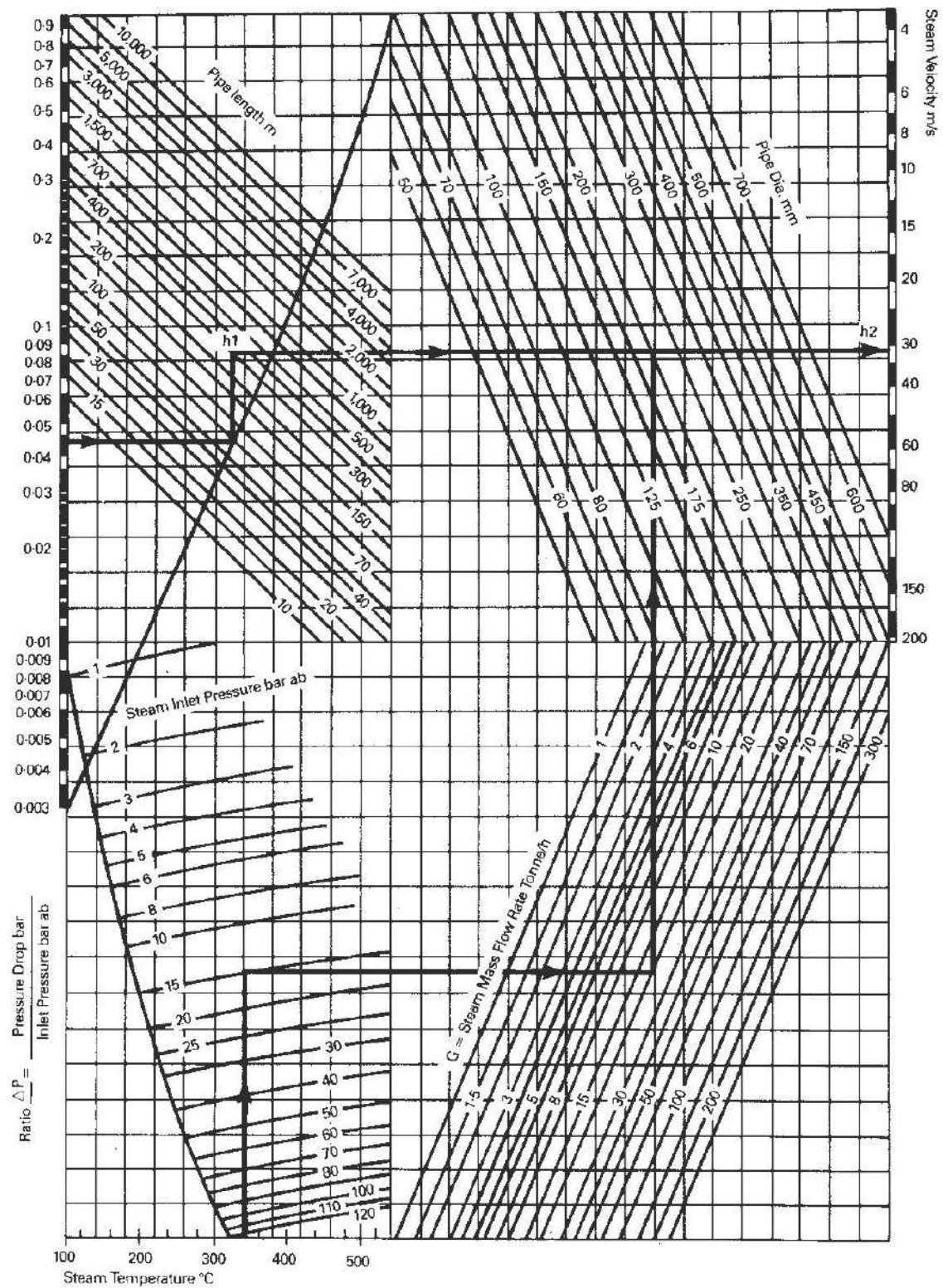
- D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m
- v = ความเร็วไอน้ำ, m/s
- $\dot{m}$ = อัตราการไหลของไอน้ำในท่อ, kg/s
- s = ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำที่ความดันทำงาน, m³/kg

- 4.4.1.5 สำหรับท่อไอน้ำอ้อมตัวความยาวไม่มาก ที่ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงความดันไอน้ำที่จะลดลงที่ปลายท่อ (Friction Loss) การหาขนาดของท่อไอน้ำ อาจจะหาจากตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ท่อประธานและท่อแยก

Pressure bar g	Velocity m/s	Steam flow kg/h										
		15 mm	20 mm	25 mm	32 mm	40 mm	50 mm	65 mm	80 mm	100 mm	125 mm	150 mm
0.4	15	7	14	24	37	52	99	145	213	394	648	917
	25	10	25	40	62	92	162	265	384	675	972	1457
	40	17	35	64	102	142	265	403	576	1037	1670	2303
0.7	15	7	16	25	40	59	109	166	250	431	680	1006
	25	12	25	45	72	100	182	287	430	716	1145	1575
	40	18	37	68	106	167	298	428	630	1108	1712	2417
1.0	15	8	17	29	43	65	112	182	260	470	694	1020
	25	12	26	48	72	100	193	300	445	730	1160	1660
	40	19	39	71	112	172	311	465	640	1150	1800	2500
2.0	15	12	25	45	70	100	182	280	410	715	1125	1580
	25	19	43	70	112	162	295	428	656	1215	1755	2520
	40	30	64	115	178	275	475	745	1010	1895	2925	4175
3.0	15	16	37	60	93	127	245	385	535	925	1505	2040
	25	26	56	100	152	225	425	632	910	1580	2480	3440
	40	41	87	157	250	375	595	1025	1460	2540	4050	5940
4.0	15	19	42	70	108	156	281	432	635	1166	1685	2460
	25	30	63	115	180	270	450	742	1080	1980	2925	4225
	40	49	116	197	295	456	796	1247	1825	3120	4940	7050
5.0	15	22	49	87	128	187	352	526	770	1295	2105	2835
	25	36	81	135	211	308	548	885	1265	2110	3540	5150
	40	59	131	225	338	495	855	1350	1890	3510	5400	7870
6.0	15	26	59	105	153	225	425	632	925	1555	2525	3400
	25	43	97	162	253	370	658	1065	1520	2530	4250	6175
	40	71	157	270	405	595	1025	1620	2270	4210	6475	9445
7.0	15	29	63	110	165	260	445	705	952	1815	2765	3990
	25	49	114	190	288	450	785	1205	1750	3025	4815	6900
	40	76	177	303	455	690	1210	1865	2520	4585	7560	10880
8.0	15	32	70	126	190	285	475	800	1125	1990	3025	4540
	25	54	122	205	320	465	810	1260	1870	3240	5220	7120
	40	84	192	327	510	730	1370	2065	3120	5135	8395	12470
10.0	15	41	95	155	250	372	626	1012	1465	2495	3995	5860
	25	66	145	257	405	562	990	1530	2205	3825	6295	8995
	40	104	216	408	615	910	1635	2545	3600	6230	9880	14390
14.0	15	50	121	205	310	465	810	1270	1870	3220	5215	7390
	25	85	195	331	520	740	1375	2080	3120	5200	8500	12560
	40	126	305	555	825	1210	2195	3425	4735	8510	13050	18630

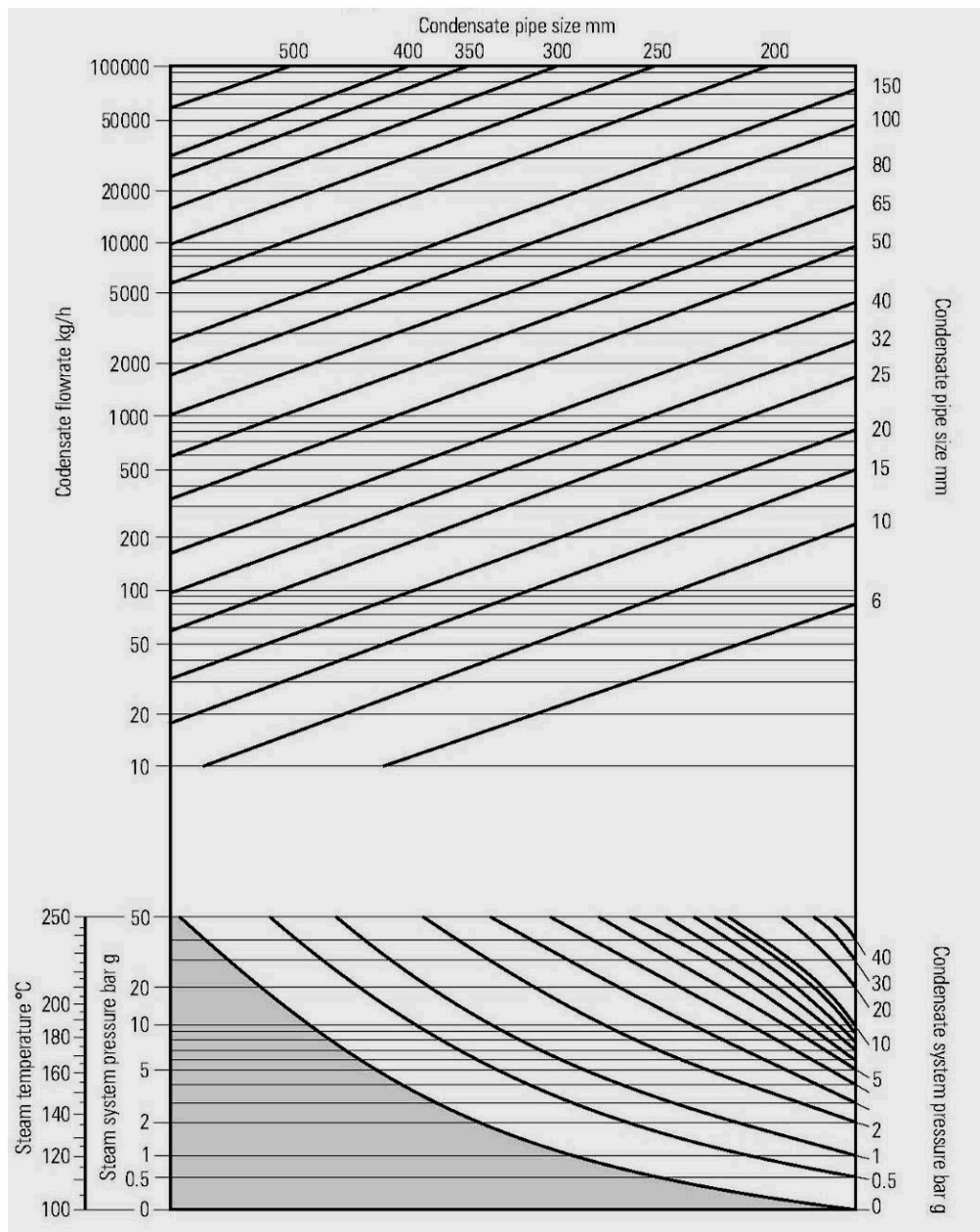
4.4.1.6 ถ้าเป็นท่อไอน้ำที่มีความยาวมากกว่า 30 m หรือจะต้องพิจารณาความดันไอน้ำที่จะลดลงอันเนื่องจากแรงเสียดทานของท่อ หรือเป็นท่อไอน้ำขดยิ่ง อาจะหาขนาดท่อไอน้ำจากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปใช้หาขนาดท่อประธานที่มีขนาดยาวมาก ๆ สำหรับไอร้อนยวดยิ่ง

4.4.2 การกำหนดขนาดของท่อไอน้ำกลั่นตัว

- 4.4.2.1 ถ้าท่อไอน้ำกลั่นตัวมีแต่น้ำไม่มีไอน้ำ สามารถการกำหนดขนาดของขนาดของท่อไอน้ำกลั่นตัว จากความเสียดทานของน้ำภายในท่อไอน้ำกลั่นตัว
- 4.4.2.2 ถ้ามีไอน้ำในท่อหรือไม่แน่ใจ การกำหนดขนาดของขนาดของท่อไอน้ำกลั่นตัว กำหนดขนาดจากความดันในท่อไอน้ำและความดันในท่อไอน้ำกลั่นตัว จากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงขนาดท่อไอน้ำกลั่นตัว

4.4.3 ความหนาท่อ

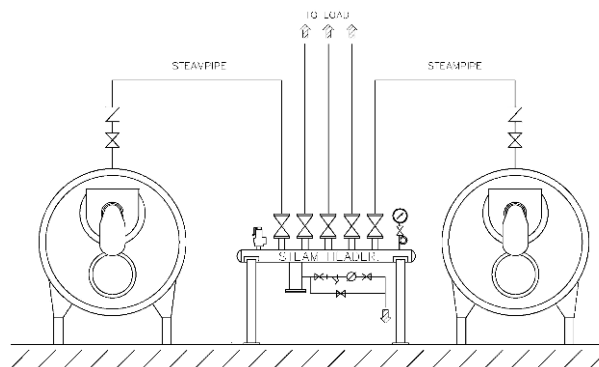
- 4.4.3.1 ความหนาท่อไอน้ำควรใช้ตัวคูณความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 2 เนื่องจากท่อไอน้ำอาจมีพรีออนไอน้ำได้รุนแรง
- 4.4.3.2 ความหนาของท่อไอน้ำและไอน้ำกลั่นตัว ควรใช้ท่อความหนาไม่น้อยกว่า Sch.40
- 4.4.3.3 ความหนาของท่อ คำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{PD}{2SE + 2yP} + C \quad (4-2)$$

t	=	ความหนาท่อต่ำสุดที่ต้องการ ,mm		
P	=	ความดันไออนุญาตใช้งานสูงสุด, MPa	D	= เส้นผ่านศูนย์กลางกลางนอก ,mm
S	=	ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของวัสดุท่อ, MPa		
E	=	สัมประสิทธิ์ของรอยเชื่อม = 1 (สำหรับท่อไร้ตะเข็บหรือท่อเชื่อม)		
y	=	สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (ตามตารางที่ A1)		
C	=	ค่าคงต่ำสุดสำหรับการต่อแบบต่างๆ (ตามตารางที่ A2)		

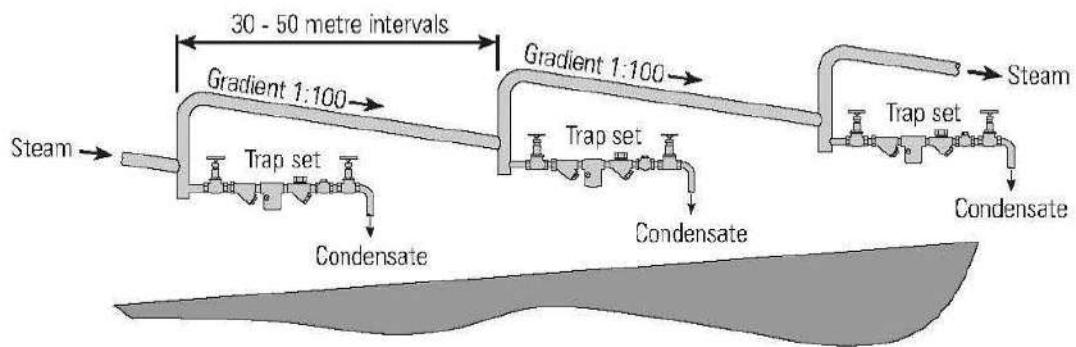
4.5 การติดตั้งท่อประธานของท่อไอน้ำและท่อไอน้ำกลั่นตัว

- 4.5.1 หม้อไอน้ำตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป ถ้าท่อจ่ายไอน้ำต่อรวมกัน ต้องติดตั้งลิ้นกั้นกลับ (Check Valve, Non Return Valve) ที่ท่อจ่ายไอน้ำของหม้อไอน้ำทุกเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



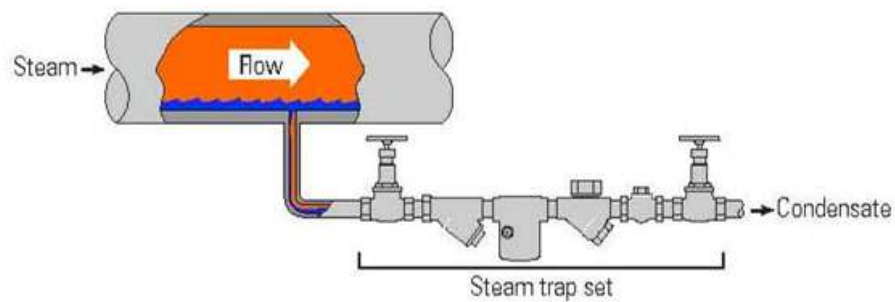
รูปที่ 4.3 หม้อไอน้ำตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป ต้องติดตั้งลิ้นกั้นกลับที่ท่อจ่ายไอน้ำของหม้อไอน้ำทุกเครื่อง

- 4.5.2 ลิ้นจ่ายไอน้ำต้องเป็นชนิดปิดเปิดช้า เช่น เกทวาล์ว (Gate Valve) หรือ โกล์บวาล์ว (Globe Valve) ต้องติดตั้งที่ด้านบนของตัวหม้อไอน้ำ ถึงพักไอน้ำ (Steam Header) โดยติดตั้งให้ใกล้กับโครงสร้างรับความดันมากที่สุด
- 4.5.3 ท่อจ่ายไอน้ำ ต้องหุ้มฉนวนกันความร้อน รวมทั้งที่ตัวหม้อไอน้ำ ลิ้นจ่ายไอน้ำ (Main Steam Valve) ถึงพักไอน้ำ
- 4.5.4 ท่อไอน้ำจะต้องให้มีการลาดเอียงลงในอัตราส่วน 1:100-1:250 เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวในท่อไอน้ำ สามารถไหลไปในท่อได้ แม้ว่าจะไม่มีการไหลของไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

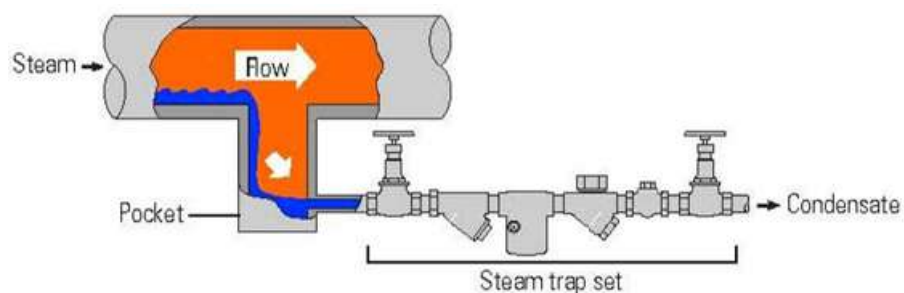


รูปที่ 4.4 ท่อไอน้ำควรลาดเอียง 1:100-1:250 และต้องมีถังดักน้ำ (Pocket) ไอน้ำกลั่นตัว สำหรับดักน้ำ Condensate

4.5.5 ท่อไอน้ำยาวทุกๆ ระยะประมาณ 30-50 m ควรมีจุดพักไอน้ำกลั่นตัว ถึงพักรับน้ำกลั่นตัว พร้อมระบบอุปกรณ์กับดักไอน้ำที่จะปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปจากท่อไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ค่าแนะนำของถังพักไอน้ำกลั่นตัว

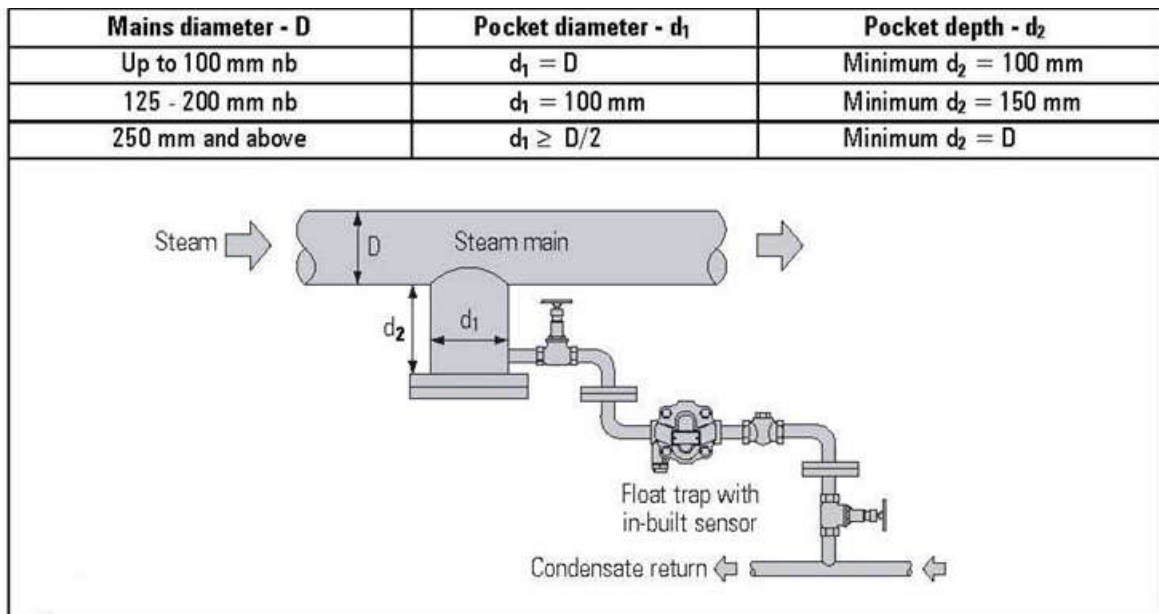


(a) ไม่เหมาะสมเพราะถังดักไอน้ำเล็กเกินไปหรือไม่มี



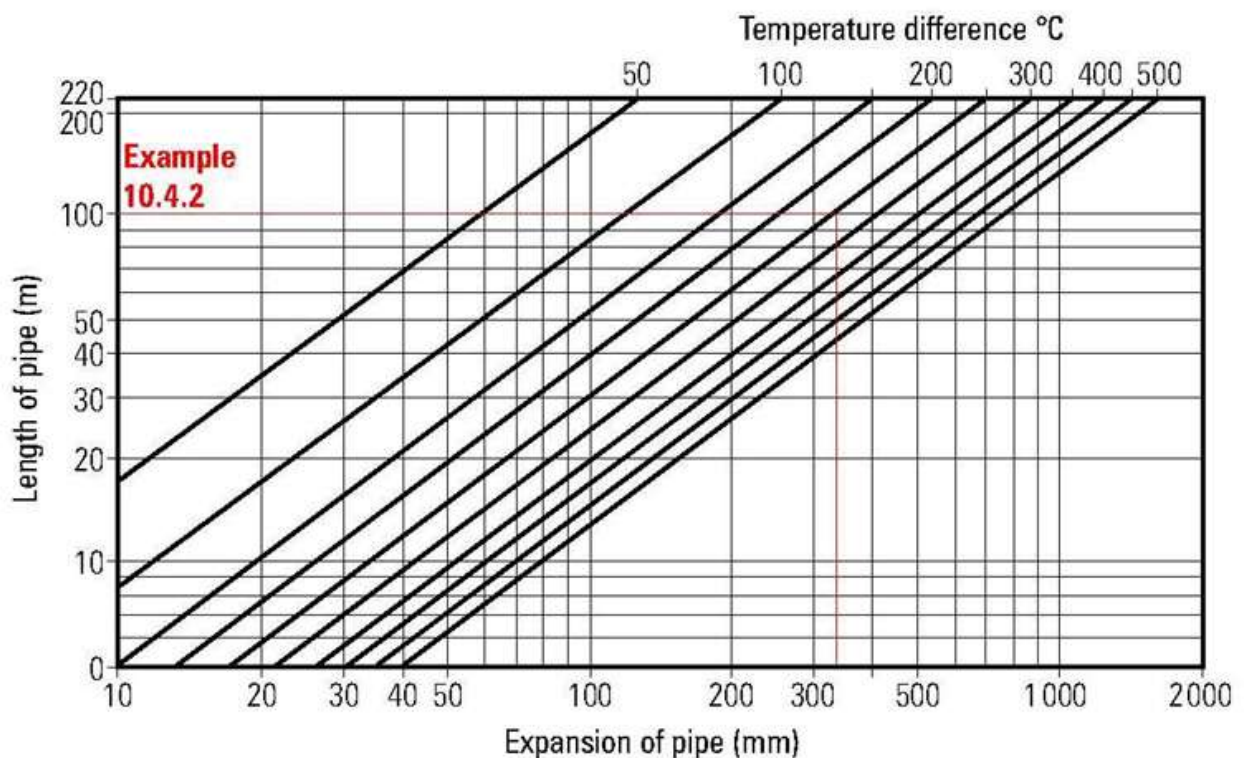
(b) เหมาะสมเพราะมีถังดักไอน้ำ

รูปที่ 4.5 แสดงรูปการติดตั้งถังดักไอน้ำ (Trap Pocket) ที่เหมาะสมและไม่เหมาะสม



รูปที่ 4.6 ขนาดของถังดักไอน้ำกลั่นตัว

4.5.6 ท่อไอน้ำจะมีการขยายตัวเมื่อมีไอน้ำ ดังนั้นการออกแบบท่อไอน้ำจะต้องมีการออกแบบให้มีการรองรับการขยายตัวของท่อจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ตามหลักทางวิศวกรรม โดยใช้การพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4.7 และการหาอุณหภูมิอาจใช้ตารางที่ 4.4

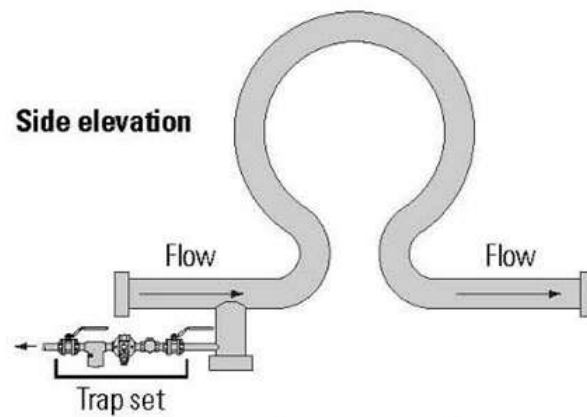


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการขยายตัวของท่อที่อุณหภูมิต่างๆ

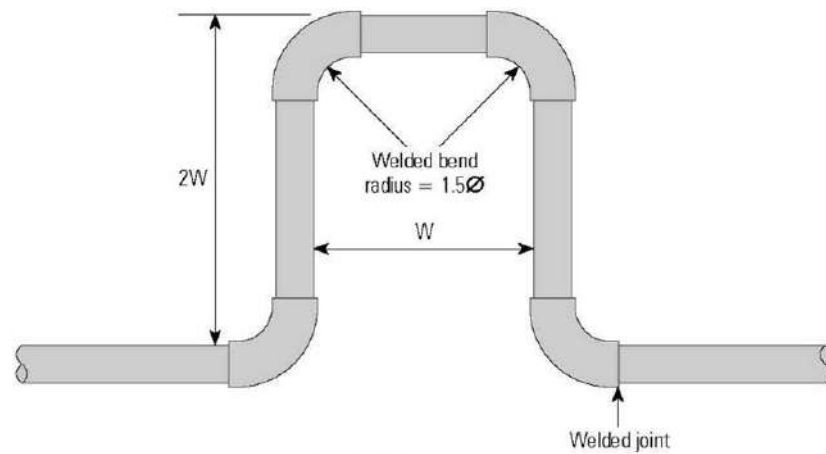
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความดันไอน้ำอิ่มตัวและอุณหภูมิ ใช้คู่กับกราฟรูปที่ 4.7

bar g	1	2	3	4	5	7.5	10	15	20	25	30
°C	120	134	144	152	159	173	184	201	215	226	236

4.5.7 สำหรับในกรณีที่ไม่สามารถรับการขยายตัวจากความเค้นหรือความเครียดได้ในทางวิศวกรรมสามารถใช้ Omega Loop, Expansion Loop หรือ Expansion Joint ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9

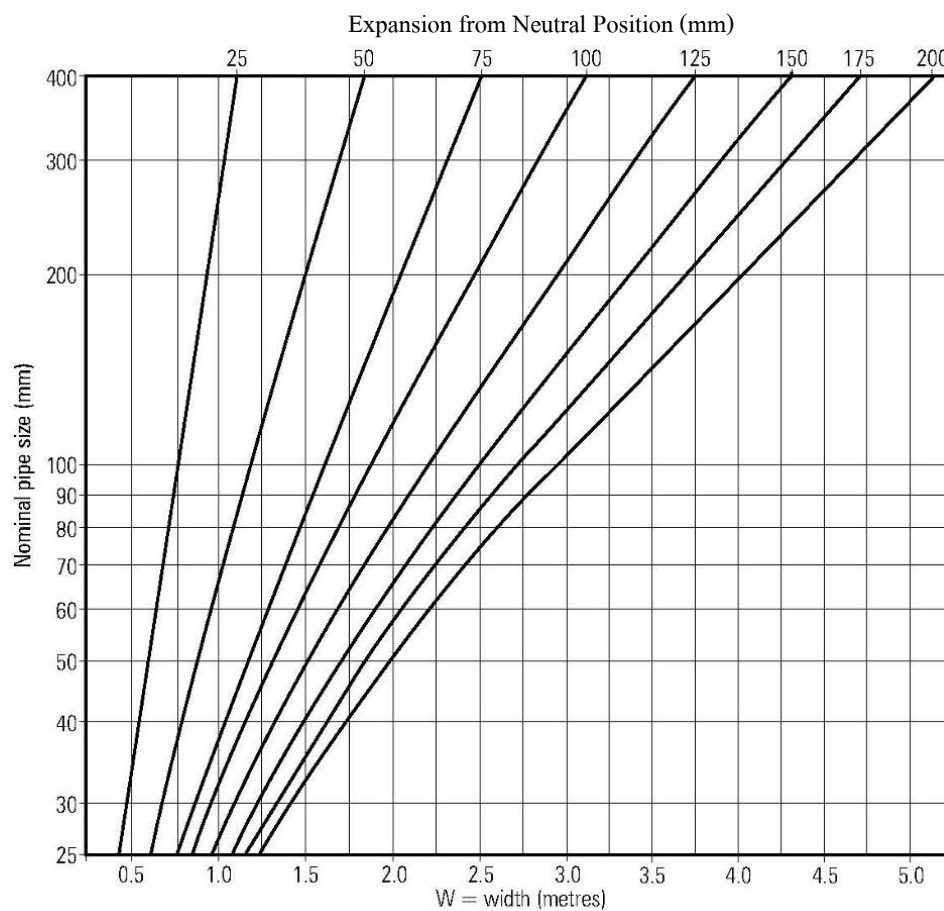


รูปที่ 4.8 Horseshoe or Lyre Loop



รูปที่ 4.9 Expansion Loop

หมายเหตุ การหาขนาดของ Expansion Loop สำหรับท่อคาร์บอนให้ใช้ขนาดตามรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างการติดตั้ง

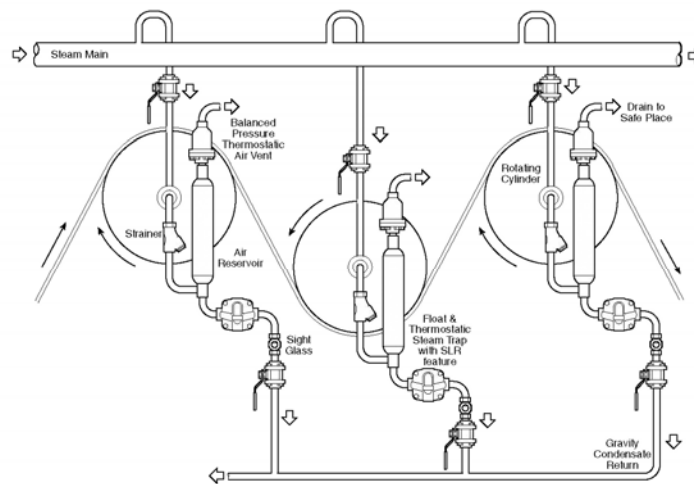


รูปที่ 4.10 กราฟใช้หาขนาดของ Expansion Loop สำหรับท่อคาร์บอน



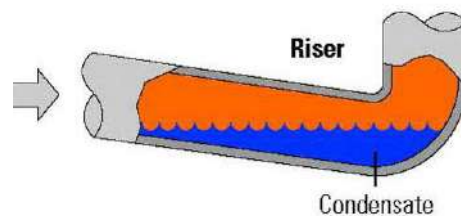
รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์รองรับการขยายตัวและหดตัวของท่อ

4.5.8 การต่อท่อไอน้ำแยกออกไปใช้งานจากท่อประธาน จะต้องต่อท่อแยกออกจากทางด้านบนของท่อประธาน เท่านั้น เพื่อไม่ให้น้ำกลั่นตัวไหลลงไปในท่อแยกได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



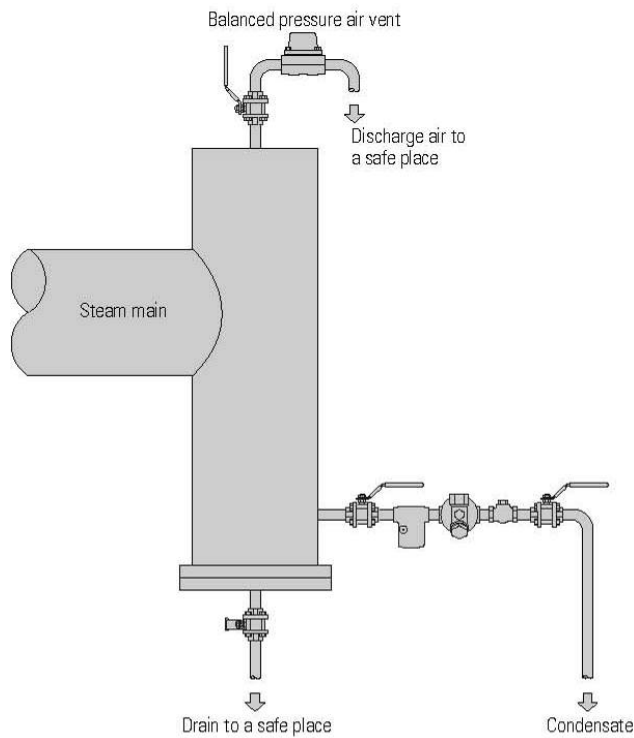
รูปที่ 4.12 ท่อไอน้ำต้องต่อแยกจากด้านบนท่อประธานเท่านั้น

4.5.9 ทุกๆจุด ที่มีการขดตัวของท่อไอน้ำที่จะมีไอน้ำกลั่นตัวขังอยู่ ดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นต้องมีจุดพักรับไอน้ำกลั่นตัว พร้อมระบบอุปกรณ์กับดักไอน้ำที่จะปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปจากท่อไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



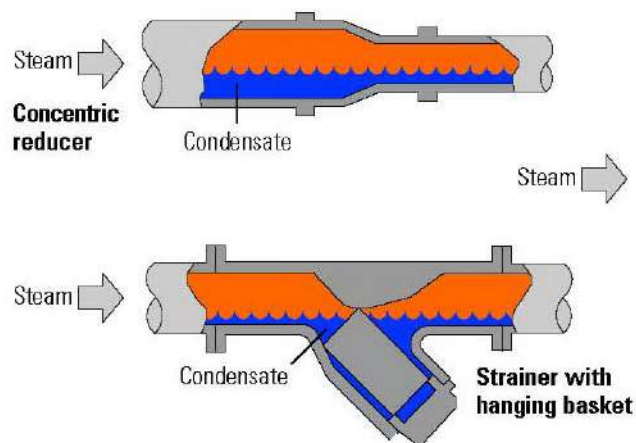
รูปที่ 4.13 ไอน้ำกลั่นตัวที่ขังอยู่ในท่อยกตัว

4.5.10 ที่ปลายสุดของท่อไอน้ำนอกจากจะต้องมีจุดถึงพักรับไอน้ำกลั่นตัว พร้อมระบบอุปกรณ์กับดักไอน้ำที่จะปล่อย น้ำกลั่นตัวออกไปจากท่อไอน้ำแล้ว จะต้องมีการระบายอากาศแบบอัตโนมัติติดตั้งไว้ด้วย ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงจุดระบายน้ำกลั่นตัวและอากาศออกจากปลายท่อประจານ

4.5.11 การติดตั้งอุปกรณ์ในท่อไอน้ำต้องหลีกเลี่ยงจุดที่จะทำให้เกิดน้ำกลั่นตัวขังขึ้นได้เช่น ไม่ควรใช้ข้อลดกลมในการลดขนาดท่อไอน้ำลง ควรใช้ข้อลดเบี้ยวแทนหรือการติดตั้งไส้กรองสิ่งสกปรกควรติดตั้งในท่าตะแคง 90 องศา เป็นต้น



รูปที่ 4.15 การติดตั้งข้อลดเบี้ยวแทนหรือการติดตั้งไส้กรองสิ่งสกปรก

4.5.12 ท่อไอน้ำและท่อไอน้ำน้ำกลั่นตัวการออกแบบตัวรองรับท่อและระยะของตัวรองรับท่อจะต้องเพื่อมวลของน้ำที่จะเติมท่อและฉนวนความร้อนด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการติดตั้งท่อ

Nominal pipe size (mm)		Interval of horizontal run (metre)		Interval of vertical run (metre)	
Steel bore	Copper outside diameter	Mild steel	Copper	Mild steel	Copper
	15		1.2	2.4	1.8
15		1.8		3.0	
20	22	2.4	1.2	3.0	1.8
25	28	2.4	0.5	3.0	2.4
32	35	2.4	1.8	3.7	3.0
40	42	2.4	1.8	3.7	3.0
50	54	2.4	1.8	4.6	3.0
65	67	3.0	2.4	4.6	3.7
80	76	3.0	2.4	4.6	3.7
100	108	3.0	2.4	5.5	3.7
125	133	3.7	3.0	5.5	3.7
150	159	4.5	3.7	5.5	
200		6.0		8.5	
250		6.5		9.0	
300		7.0		10.0	

4.6 ก๊อบดักไอน้ำ

ก๊อบดักไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งที่ทางด้านออกของเครื่องจักรที่ใช้ไอน้ำ ทำหน้าที่ปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปจากเครื่องจักร แต่ก๊อบดักไม่ทำให้ไอน้ำไหลออกจากเครื่องจักร จนสูญเสียไอน้ำทั้งหมดออกไป โดยที่ไอน้ำยังไม่ได้ถูกใช้งาน ชนิดของก๊อบดักไอน้ำที่สำคัญมีดังนี้

4.6.1 ก๊อบดักไอน้ำชนิดรูออริฟิค (Orifice Plate) หรือวาล์วปรับ (Needle Valve)

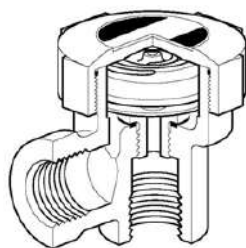
ก๊อบดักไอน้ำแบบที่มีแต่รูขนาดเล็กให้น้ำกลั่นตัวไหลผ่านแบบสม่ำเสมอ หรืออาจจะใช้วาล์วแบบเข็มที่ปรับอัตราการไหลของน้ำกลั่นตัวให้ไหลมากหรือน้อยได้ด้วยการปรับด้วยมือ นำมาติดตั้งใช้งานกับเครื่องจักรที่ใช้ไอน้ำนั้น

- 4.6.1.1 ข้อดีของก๊อบดักไอน้ำชนิดรูออริฟิค ไม่มีกลไกเคลื่อนไหวจึงเสียหายยาก ไม่จำเป็นต้องมีการดูแลรักษา มาก ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเพราะมีขนาดเล็ก
- 4.6.1.2 ข้อเสียของก๊อบดักไอน้ำชนิดรูออริฟิค อัตราการเกิดน้ำกลั่นของเครื่องจักรที่ใช้ไอน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าอัตราการเกิดน้ำกลั่นของเครื่องจักรจะคงที่สม่ำเสมอในการทำงานก็ตาม แต่อุณหภูมิภายนอกเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดน้ำกลั่นก็จะมีการเปลี่ยนแปลง หรือในการเกิดน้ำกลั่นในขณะเริ่มเดินเครื่องเย็น (Cold start) ซึ่งจะมีมากกว่าเมื่อเดินเครื่องไปแล้ว ดังนั้นรูที่ใหญ่ก็จะปล่อยไอน้ำทิ้งในช่วงที่มีน้ำกลั่นตัวน้อย แต่ถ้ารูเล็กก็จะปล่อยน้ำกลั่นตัวไม่ทันในช่วงที่มีการเกิดน้ำกลั่นตัวมาก และรูที่เล็กมากก็อาจอุดตันจากสิ่งสกปรกได้ง่าย ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงในการใช้รูออริฟิค (Orifice Plate) หรือวาล์วปรับ (Needle valve)
- 4.6.1.3 ไม่แนะนำให้ใช้รูออริฟิคหรือวาล์วปรับมาใช้งานเป็นก๊อบดักไอน้ำ เพราะมีปัญหาทั้งการอุดตันของน้ำกลั่นตัวและปัญหาการปล่อยไอน้ำทิ้ง

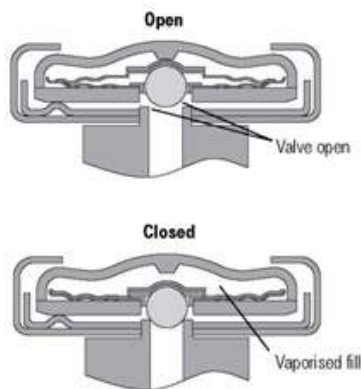
4.6.2 กักน้ำเทอร์โมสแตติก (Thermostatic Group)

4.6.2.1 กักน้ำแบบความดันสมดุล (Balanced Pressure Thermostatic Type)

กักน้ำเทอร์โมสแตติกแบบความดันสมดุลจะมีชุดแคปซูล (Thermostatic Element) ซึ่งภายในแคปซูลบรรจุอยู่ด้วยแอลกอฮอล์ผสมซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ ตัวแคปซูลเป็นโครงสร้างโลหะขึ้นรูปเป็นกล่องหีบเพลง (Bellow) ซึ่งสามารถขยายหรือหดตัวตามความดันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของแอลกอฮอล์ผสมที่อยู่ภายใน การทำงานเมื่อเปิดไอน้ำเข้าสู่เครื่องจักร อากาศและน้ำกลั่นตัวจะถูกไล่ผ่านวาล์วออกไปได้ด้วยแรงดันของไอน้ำ เมื่อน้ำกลั่นตัวเริ่มร้อนขึ้นเข้ามา จะถ่ายเทความร้อนให้กับแอลกอฮอล์ผสมภายในแคปซูลถึงจุดเดือดเกิดความดันภายในแคปซูลเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าความดันภายนอกแคปซูลทำให้แคปซูลขยายตัวปิดวาล์ว กักน้ำก็จะปิด ทำให้น้ำกลั่นตัวและไอน้ำถูกขังไว้ไม่สามารถรั่วไหลออกไปได้ จนเมื่อน้ำกลั่นตัวในกักน้ำเย็นลง แอลกอฮอล์ผสมในแคปซูลเย็นตัวลงควบแน่นเป็นของเหลว ความดันภายในแคปซูลลดลงตัวหีบเพลงหดตัวลงทำให้วาล์วเปิด น้ำกลั่นตัวก็จะถูกปล่อยออกไปอีกครั้งหนึ่ง ทำงานสลับกันวนกลับไปกลับมาเช่นนี้ตลอดเวลา



(a) Balanced Pressure Steam Trap with Replaceable Capsule



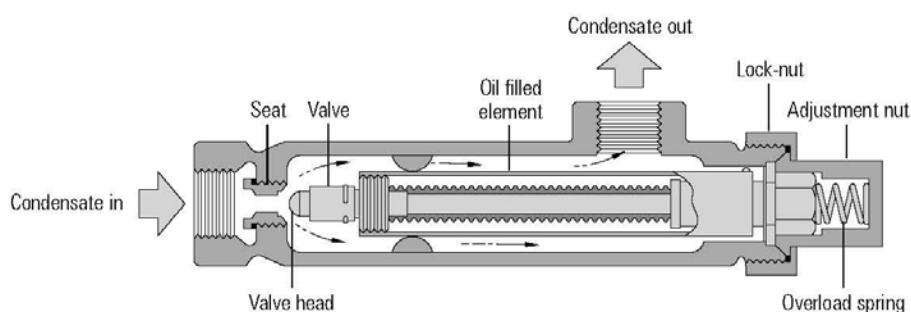
(b) Operation of Balance Pressure Steam Trap Capsule

รูปที่ 4.16 กักน้ำเทอร์โมสแตติกแบบความดันสมดุล

สำหรับความดันไอน้ำที่มาถึงในกักน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงความดันไป จะไม่มีผลต่อการทำงานของกักน้ำแบบนี้แต่อย่างใด เพราะถ้าไอน้ำมีความดันสูง ไอน้ำก็จะมีอุณหภูมิสูง ทำให้ความดันในแคปซูลที่เกิดจากแอลกอฮอล์ผสมเดือดสูงขึ้นตาม กักน้ำแบบนี้จะทำงานจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของไอน้ำกับน้ำกลั่นตัว

- (ก) ข้อดีของก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุล ก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุลมีขนาดเล็ก ปล่อน้ำกลั่นตัวได้มากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวก๊ับดักไอน้ำ สามารถปล่อน้ำออกไปได้เองตอนเริ่มทำงานจ่ายไอน้ำ ทำให้ไม่เกิดการอื่น ไม่ยอมปล่อน้ำกลั่นตัวจากไอน้ำ(Steam Lock) ปล่อน้ำกลั่นตัวได้มากขึ้นถ้ามีน้ำกลั่นตัวเข้ามาสามารถปรับตัวเองโดยอัตโนมัติให้เหมาะสมกับความดันไอน้ำต่าง ๆ ชุดแกลปซูลและหน้าวาล์วถอดเปลี่ยนได้รวดเร็วโดยไม่ต้องถอดก๊ับดักไอน้ำออกมาจากท่อ
- (ข) ข้อเสียของก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุล ชุดแกลปซูลมีความบอบบางอาจเสียหายได้จากการกระแทกของน้ำ (Waterhammer) หรือการกัดกร่อน แต่สามารถใช้แกลปซูลที่เป็นสแตนเลสสตีลกับดักไอน้ำแบบความดันสมดุลแบบธรรมดาจะไม่สามารถใช้กับไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam) เพราะอุณหภูมิที่สูงมากจะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในแกลปซูลและความดันนั้นจะไม่สมดุลกับความดันภายนอกแกลปซูลจนเกิดความเสียหายได้ ต้องใช้ก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุลที่ออกแบบให้ทนสภาวะไอน้ำยวดยิ่งได้ ซึ่งตัวแกลปซูลจะประกอบด้วยไดอะแฟรมคู่หนึ่งประกบกันได้พอดีตรงที่ของท่อยึดหัดเดิม การใช้งานก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุลต้องระวังว่าวาล์วจะไม่เปิดออกจนกว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นตัวจะลดลงจนถึงระดับระดับหนึ่งซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของไอน้ำ ดังนั้นการใช้งานจึงต้องคำนึงถึงจุดนี้ บางครั้งอาจแก้ปัญหาโดยการติดตั้งกับดักไอน้ำแบบความดันสมดุลให้ไกลจากเครื่องจักรเล็กน้อย หรือให้มีการระบายความร้อนของตัวก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุล
- (ค) ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบความดันสมดุล ก๊ับดักไอน้ำแบบความดันสมดุลทำงานด้วยความร้อนจึงทำตอบสนองช้าเล็กน้อย ควรเลือกใช้งานในเครื่องจักรที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวสม่ำเสมอตลอดเวลา และเหมาะสมมากกับเครื่องจักรที่เวลาทำงาน ความดันไอน้ำในเครื่องจักรเปลี่ยนแปลงเสมอ ไม่ควรใช้งานกับเครื่องจักรที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวมากเป็นพักๆ และมีการกระแทกของก้อนน้ำและการกัดกร่อน

4.6.2.2 ก๊ับดักไอน้ำแบบการขยายตัวของของเหลว (Liquid Expansion Thermostatic Type)



รูปที่ 4.17 ก๊ับดักไอน้ำเทอร์โมสแตติกแบบทำงานด้วยการขยายตัวของของเหลว

ดักไอน้ำแบบการขยายตัวของของเหลวทำงานด้วยการขยายตัวและหดตัวของแกลปซูล(Oil fill element) ที่มีน้ำมันบรรจุอยู่ภายใน การขยายตัวและหดตัวของแกลปซูลเกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของไอน้ำและน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามา ในตอนแรกเมื่อเปิดไอน้ำเข้ามาแกลปซูลที่หดตัวเพราะ

ยังเย็นอยู่ อากาศกับน้ำกลั่นตัวจะถูกไล่ออกจากหน้าวาล์วที่เปิดอยู่ เมื่อน้ำกลั่นตัวที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนก็จะถ่ายเทในกับน้ำมันที่อยู่ภายใน ทำให้น้ำมันขยายตัว การขยายตัวของน้ำมันจะไปดันให้ลูกสูบยืดยืดออกน้ำกลั่นตัวก็จะไหลน้อยลงจนปิด ซึ่งตำแหน่งของการปิดวาล์วสามารถตั้งอุณหภูมิของการปิดได้ที่ตัวปรับที่ปลายลูกสูบอีกด้านที่มีตัวปรับอยู่ภายนอก ถ้าอัตราการเกิดน้ำกลั่นตัวเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ วาล์วก็จะเปิดในตำแหน่งที่ให้น้ำกลั่นตัวไหลออกในปริมาณที่คงที่

ถ้าปริมาณน้ำกลั่นตัวมีมากขึ้น น้ำกลั่นตัวที่สะสมจะทำให้แคลปซูลเย็นตัวลงอีกและหดตัวลง ไปดึงวาล์วกลับเปิดกว้างขึ้นทำการปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปได้มากขึ้น ในทางกลับกันถ้ามีปริมาณน้ำกลั่นตัวลดลง อุณหภูมิของแคลปซูลจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอยู่ใกล้กับไอน้ำมากขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะทำให้น้ำมันภายในแคลปซูลขยายตัวและดันลูกสูบให้วาล์วปิดแคลลง ทำให้น้ำกลั่นตัวไหลออกได้น้อยลง ดังนั้นคิกไอน้ำแบบการขยายตัวของของเหลวจะมีการปรับตัวเองให้เปิดมากขึ้นหรือน้อยลงตามภาระของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามา

นอกจากนี้คิกไอน้ำแบบการขยายตัวของของเหลวยังสามารถปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ปล่อยออกให้มีอุณหภูมิ 100 °C หรือต่ำกว่านั้น

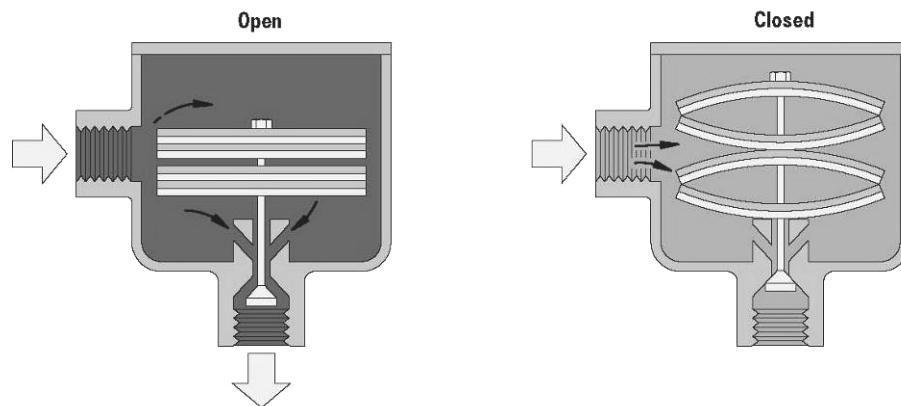
(ก) ข้อดีของกับคิกไอน้ำแบบขยายตัวด้วยของเหลว คิกไอน้ำแบบการขยายตัวของของเหลวสามารถปรับให้เปิดระบายน้ำกลั่นตัวออกที่อุณหภูมิต่ำได้ สามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานไอน้ำได้ในกรณีที่เครื่องจักรใช้ไอน้ำยอมให้มีการแข็งตัวของน้ำกลั่นตัวในเครื่องจักรได้ โดยไม่กระทบกับการทำงาน

คิกไอน้ำแบบการขยายตัวของของเหลวสามารถปล่อยอากาศออกไปได้เองตอนเริ่มทำงานจ่ายไอน้ำ ทำให้ไม่เกิดการอื่น ไม่ขอปลดปล่อยน้ำกลั่นตัวจากไอน้ำ(Steam lock) มีการปรับตัวเองให้ปล่อยน้ำกลั่นตัวมากขึ้นหรือน้อยลงตามภาระของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามา สามารถใช้งานกับไอน้ำขดขึงได้และทนทานต่อการสั่นสะเทือนและการกระแทกของน้ำได้ดีเพราะแคลปซูลที่มีน้ำมันอยู่ภายในโครงสร้างของลูกสูบโลหะ

(ข) ข้อเสียของกับคิกไอน้ำแบบขยายตัวด้วยของเหลว เนื่องแคลปซูลทำงานโดยการขยายตัวของน้ำมัน จึงตอบสนองช้า ถ้าความดันไอน้ำในกับคิกไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว แคลปซูลจะไม่สามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้ และไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการปล่อยน้ำกลั่นตัวออกจากกระบอกอย่างรวดเร็ว

(ค) ลักษณะการเลือกใช้งานกับคิกไอน้ำแบบขยายตัวด้วยของเหลว กับคิกไอน้ำแบบขยายตัวด้วยของเหลว ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำและการกัดกร่อนพอสมควร แต่ทำงานด้วยความร้อนจึงทำตอบสนองช้า ควรเลือกใช้งานในเครื่องจักรที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวสม่ำเสมอตลอดเวลา ไม่ควรใช้งานกับเครื่องจักรที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวมากเป็นพักๆ

4.6.3 กักดันน้ำแบบโลหะสองชนิด (Bimetal Type)



รูปที่ 4.18 กักดันน้ำเทอร์โมสแตติกแบบโลหะสองชนิด

กักดันน้ำแบบโลหะสองชนิดมีวาล์วปล่อยน้ำกลั่นตัวที่การเคลื่อนที่ของวาล์วล้ากักดันน้ำแบบเทอร์โมสแตติก แต่การเคลื่อนที่ปิดเปิดของวาล์วแทนที่จะใช้การขีดหัวของแคลปซูลที่บรรจุของเหลว กลับใช้การโค้งงอของแผ่นโลหะที่มีโลหะ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน นำมาติดกันให้อยู่บนแผ่นเดียวกัน เมื่อแผ่นโลหะทั้ง 2 ชนิดได้รับความร้อน การขยายตัวโลหะทั้ง 2 ชนิด จะมีการขยายตัวไม่เท่ากัน จึงเกิดการดึงกันเองจนแผ่นโลหะนั้นจึงโค้งงอขึ้น การโค้งงอของแผ่นโลหะแผ่นเดียวมีระยะการเคลื่อนที่น้อย จึงต้องนำแผ่นโลหะ 2 ชนิดหลายๆแผ่นมาเรียงสลับกันทำให้เกิดระยะการเคลื่อนที่ที่มากขึ้นเพียงพอที่จะปิดเปิดวาล์วปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปได้

การทำงานของกักดันน้ำแบบโลหะสองชนิดนั้น ก่อนที่ไอน้ำจะเข้ามาที่กักดันน้ำวาล์วจะเปิดอยู่ อากาศและน้ำกลั่นตัวจะถูกไล่ผ่านวาล์วออกไปได้ด้วยแรงดันของไอน้ำ เมื่อน้ำกลั่นตัวที่เริ่มร้อนขึ้นเข้ามา แผ่นโลหะ 2 ชนิดจะร้อนขึ้นเริ่มโค้งงอ เมื่อแผ่นโลหะ 2 ชนิดมีอุณหภูมิสูงขึ้น โค้งงอมากขึ้นกักดันน้ำก็จะปิด ทำให้น้ำกลั่นตัวและไอน้ำถูกขังไว้ไม่สามารถรั่วไหลออกไปได้ จนเมื่อน้ำกลั่นตัวในกักดันน้ำเย็นลง แผ่นโลหะ 2 ชนิดเย็นตัวลงการโค้งงอลดลง วาล์วเริ่มเปิดปล่อยน้ำกลั่นตัวอีกครั้งหนึ่ง ทำงานสลับกันวนกลับไปกลับปมาเช่นนี้ตลอดเวลา

4.6.3.1 **ข้อดีของกักดันน้ำแบบโลหะสองชนิด** กักดันน้ำแบบโลหะสองชนิดมีขนาดเล็กสามารถระบายน้ำกลั่นตัวได้ดี สามารถปล่อยอากาศออกได้เอง ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำ (Water hammer) และการกัดกร่อน ใช้งานได้ดีกับไอน้ำความดันสูงและไอน้ำยวดยิ่ง สามารถปรับตำแหน่งวาล์วให้ทำงานที่อุณหภูมิของน้ำกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ต้องการการบำรุงรักษาน้อย เหมาะกับการปล่อยน้ำกลั่นตัวแบบสม่ำเสมอ

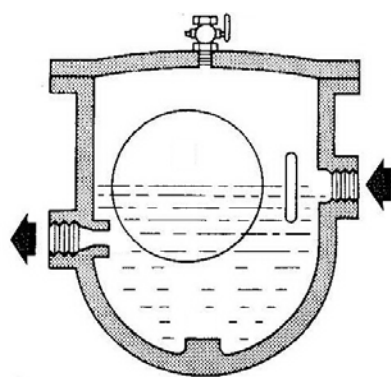
4.6.3.2 **ข้อเสียของกักดันน้ำแบบโลหะสองชนิด** เนื่องจากการทำงานของโลหะสองชนิด ทำงานโดยการร้อนขึ้นและเย็นลงของโลหะ ซึ่งทำงานช้า จึงไม่เหมาะกับงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำกลั่นตัวตลอดเวลา และถ้าติดตั้งกักดันน้ำแบบโลหะสองชนิดใกล้กับเครื่องจักร จะมีการขังของน้ำกลั่น

ตัวในเครื่องจักรในจังหวะวาล์วปิด และจะมีการปล่อยไอน้ำทิ้งออกไปในจังหวะวาล์วเปิดทำให้สูญเสียความร้อน ดังนั้นควรติดตั้งกับดักไอน้ำแบบโลหะสองชนิดให้ห่างออกไปจากเครื่องจักรพอสมควร

- 4.6.3.3 **ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบโลหะสองชนิด** เนื่องจากกับดักไอน้ำแบบโลหะสองชนิดทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำและการกัดกร่อน แต่ทำงานด้วยความร้อนและตอบสนองช้า จึงควรเลือกใช้งานในเครื่องจักรที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวสม่ำเสมอตลอดเวลา ไม่ควรใช้งานกับเครื่องจักรที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวมากเป็นพักๆ

4.6.4 กับดักไอน้ำชนิดทำงานเชิงกล (Mechanical Group)

4.6.4.1 กับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ (Free Float Type)



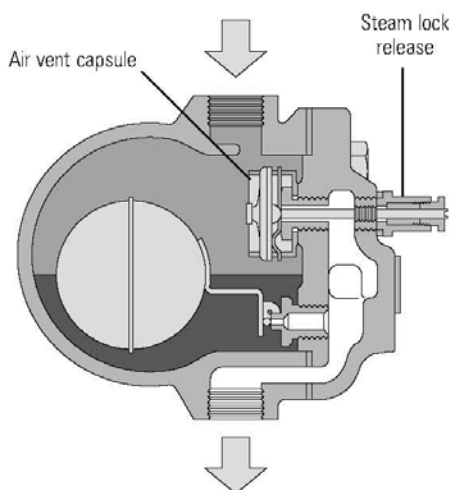
รูปที่ 4.19 กับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ

กับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระจะมีลูกลอยที่ลอยอย่างอิสระในกับดักไอน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นลูกลอยและวาล์วในตัว เมื่อไม่มีน้ำกลั่นตัวลูกลอยจะตกลงด้านล่าง ผิวเปลือกของลูกลอยจะเป็นวาล์วปิดหน้าวาล์วทางออก ทำให้ไอน้ำไม่สามารถออกไปได้ แต่เมื่อมีน้ำกลั่นตัวไหลเข้ามา น้ำจะมีระดับสูงขึ้นลูกลอยก็จะลอยขึ้น ทำให้อวาล์วเปิดปล่อยน้ำกลั่นตัวผ่านออก ไประดับน้ำภายในห้องจะลดลง ลูกลอยตกลงมาปิดวาล์วอีกครั้งหนึ่ง

- (ก) ข้อดีของกับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ ปล่อยน้ำกลั่นตัวออกได้ทุกครั้งที่มีน้ำกลั่นตัวเข้ามา ไม่ว่าจะมีน้ำกลั่นตัวเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยอย่างไร เพราะทำงานโดยลูกลอย มีชิ้นส่วนน้อย
- (ข) ข้อเสียของกับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ ไม่สามารถปล่อยอากาศออกได้ด้วยตัวเองถ้ามีอากาศเข้ามา เกิดการล็อกอากาศ(Air lock)ไม่ยอมปล่อยน้ำกลั่นตัวออก ต้องติดตั้งตัวปล่อยอากาศออกอัตโนมัติ(Automatic air vent)เพิ่ม ไม่ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำ(Water hammer) ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อน มีการรั่วไหลของไอน้ำง่ายเพราะใช้ผิวเปลือกของลูกลอยเองกดปิดวาล์ว ซึ่งจะมีแรงน้อยกว่าการใช้แรงลอยตัวหรือใช้คานช่วยกดเพิ่มแรงในการปิดวาล์ว และตำแหน่งของผิวเปลือกลูกลอยสัมผัสกับวาล์วจะเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อยๆ ซึ่งง่ายต่อการรั่วไหลของไอน้ำ

- (ค) ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ กับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระสามารถปล่อยน้ำกลั่นตัวออกตามปริมาณของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามาได้ดีมาก จึงควรเลือกใช้งานในเครื่องจักรทั่วไปที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวมากหรือน้ำกลั่นตัวมากเป็นพักๆ แต่กับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระไม่ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำและการกัดกร่อน และอาจรั่วปล่อยไอน้ำทิ้งได้ง่าย

4.6.4.2 กับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้าน (Float and Lever Type)



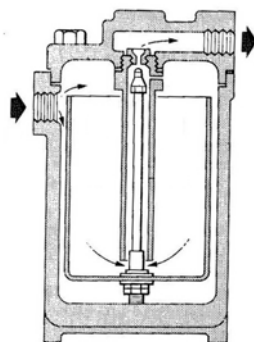
รูปที่ 4.20 กับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้าน

กับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้านจะมีลูกลอยที่ลอยขึ้นลงอยู่บนคานที่มีวาล์วติดอยู่ใกล้จุดหมุน เมื่อไม่มีน้ำกลั่นตัว ลูกลอยจะตกลง วาล์วจะถูกกดปิดลงด้วยการทดแรงจากน้ำหนักของลูกลอยที่ปลายคาน เมื่อมีน้ำกลั่นตัวไหลเข้ามาน้ำจะมีระดับสูงขึ้นลูกลอยก็จะลอยขึ้น ยกคานทำให้วาล์วเปิดปล่อยน้ำกลั่นตัวผ่านออกไป ระดับน้ำภายในห้องจะลดลง ลูกลอยตกลงมา วาล์วก็ปิดอีกครั้งหนึ่ง

- (ก) ข้อดีของกับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้าน ปล่อยน้ำกลั่นตัวออกได้ทุกครั้งที่มือน้ำกลั่นตัวเข้ามา ไม่ว่าจะมีน้ำกลั่นตัวเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยอย่างไร เพราะทำงานโดยลูกลอย สามารถระบายน้ำกลั่นตัวที่มีอุณหภูมิสูงออกได้อย่างต่อเนื่อง ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- (ข) ข้อเสียของกับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้าน ไม่สามารถปล่อยอากาศออกได้ด้วยตัวเอง เกิดการอื่นอากาศ(Air lock)ไม่ยอมปล่อยน้ำกลั่นตัวออก ต้องติดตั้งตัวปล่อยอากาศออกอัตโนมัติ(Automatic air vent)เพิ่ม ไม่ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำ(Water hammer) ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อน
- (ค) ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้าน กับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้านสามารถปล่อยน้ำกลั่นตัวออกตามปริมาณของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามาได้ดีมาก จึงควรเลือกใช้งานใน

เครื่องจักรทั่วไปที่มีปริมาณน้ำกลั่นตัวมากหรือมีน้ำกลั่นตัวมากเป็นพักๆ แต่กับดักไอน้ำแบบลูกลอยมีก้านไม่ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำและการกัดกร่อน

4.6.5 กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย (Open Top Bucket Type)

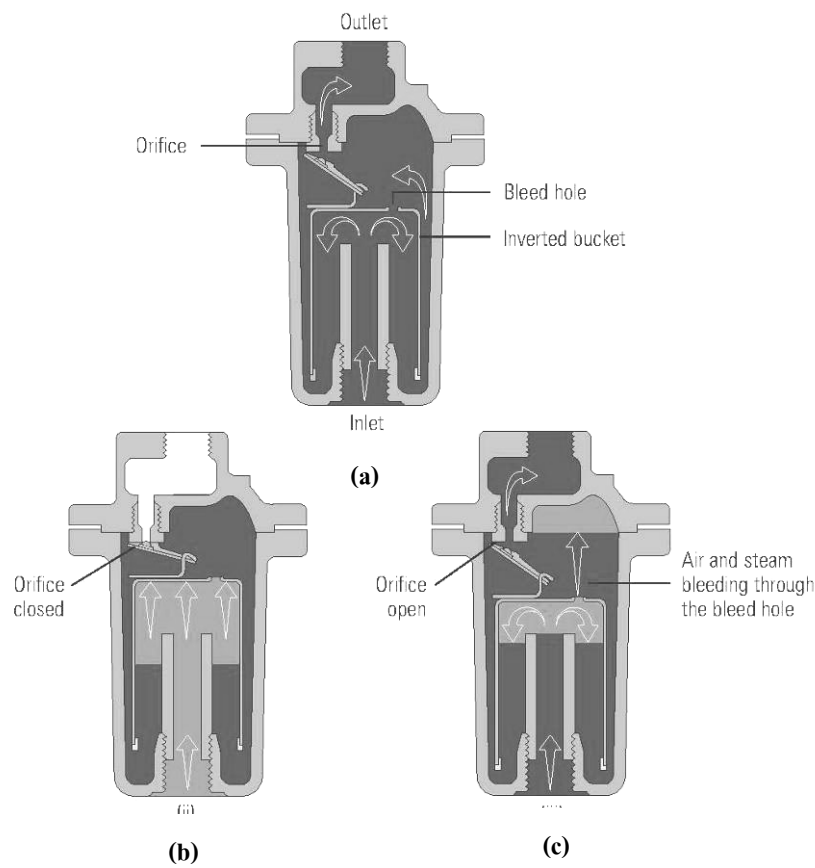


รูปที่ 4.21 กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย

กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงายจะมีถ้วยโลหะปลายเปิดติดตั้งวางหงายขึ้น ใช้ลอยตัวแทนลูกลอยในกับดักไอน้ำแบบลูกลอย เมื่อน้ำกลั่นตัวไหลเข้ามาเล็กน้อยในตอนแรก จะไหลลงไปสู่ในท้องของกับดักไอน้ำ น้ำที่ไหลอยู่นอกถ้วยหงายจะทำให้ถ้วยหงายเกิดแรงลอยตัว ตัวถ้วยหงายจะลอยขึ้นทำให้วาล์วปิด แต่เมื่อน้ำกลั่นตัวเข้ามาเพิ่มมากขึ้นจนล้นเข้าสู่ภายในถ้วยหงาย จนเมื่อมีน้ำหนักมากกว่าแรงลอยตัวถ้วยหงายก็จะตกลง วาล์วก็จะเปิดปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปด้วยแรงดันที่เข้ามา น้ำกลั่นตัวจะไหลจากด้านล่างของถ้วยหงายขึ้นไปตามท่อที่อยู่ตรงกลางถ้วยหงาย เมื่อน้ำในถ้วยหงายน้อยลงจนมีแรงลอยตัวมากกว่าน้ำหนัก ถ้วยหงายก็จะลอยขึ้นได้อีกครั้ง

- 4.6.5.1 **ข้อดีของกับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย** กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงายมีความแข็งแรงสามารถนำไปใช้ได้กับไอน้ำความดันสูง ๆ รวมทั้งไอน้ำชนิดยิ่ง ทนทานต่อการกระแทกของน้ำ ทนการกัดกร่อน ชำรุดเสียหายได้ยาก
- 4.6.5.2 **ข้อเสียของกับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย** กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงายมีขนาดใหญ่และหนักไม่สามารถปล่อยอากาศออกได้ด้วยตัวเอง เกิดการอั้นอากาศ(Air lock)ไม่ยอมปล่อยน้ำกลั่นตัวออก ต้องติดตั้งตัวปล่อยอากาศออกอัตโนมัติ (Automatic air vent) เพิ่ม
- 4.6.5.3 **ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย** กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงายปล่อยน้ำกลั่นตัวออกตามปริมาณของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามา แต่อาจจะทำงานได้ไม่ดีเท่ากับกับดักไอน้ำแบบลูกลอย จึงควรเลือกใช้งานในเครื่องจักรที่ไม่จำเป็นต้องปล่อยน้ำกลั่นตัวหมดทุกครั้ง โดยถ้ามีการไม่ปล่อยน้ำกลั่นตัวบ้างก็ไม่ทำความเสียหายให้กับขบวนการผลิตมากนัก เพราะกับดักไอน้ำแบบถ้วยหงายทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำหรือการกัดกร่อน

4.6.6 กัดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ (Inverted Bucket Type)



รูปที่ 4.22 กัดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ

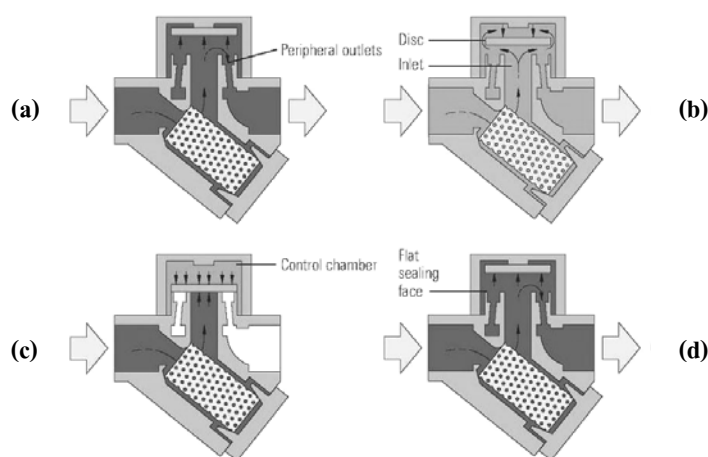
กัดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำจะมีถ้วยโลหะปลายเปิดติดตั้งวางคว่ำลง ใช้อากาศและไอน้ำดันถ้วยที่คว่ำยกลอยขึ้นในน้ำกลั่นตัวแทนลูกลอย เมื่อเริ่มเดินเครื่องถ้ามีน้ำกลั่นตัวเต็มในห้องกัดัก ถ้วยคว่ำจะจมตกดุ์ด้านล่าง ดังก้านวาล์วลงให้วาล์วเปิดออก ทำให้น้ำกลั่นตัวถูกระบายออกผ่านปากถ้วยด้านล่าง ไหลผ่านขอบถ้วยด้านบนออก ขึ้นไปออกที่วาล์วด้วยแรงดันของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามาในถ้วยคว่ำเข้ามาตามรูปที่ 4.22 (a) แต่เมื่อน้ำกลั่นตัวไหลเข้าในถ้วยน้อยลง เริ่มมีไอน้ำปนเข้ามาในถ้วยคว่ำ ถ้วยคว่ำจะลอยขึ้นคล้ายลูกลอย ทำให้ก้านวาล์วยกขึ้นจนวาล์วปิด น้ำกลั่นตัวและไอน้ำก็ถูกคักเอาไว้ตามรูปที่ 4.22 (b) ที่ด้านบนของถ้วยคว่ำจะมีรูระบายเล็กๆ ไอน้ำหรืออากาศจะค่อยๆ รั่วออกจากในถ้วยคว่ำจนแรงลอยตัวของถ้วยน้อยกว่าน้ำหนักของถ้วย ถ้วยคว่ำก็จะตกลงอีกครั้งหนึ่ง ดังก้านวาล์วลงให้วาล์วเปิดออก ทำให้น้ำกลั่นตัวถูกระบายออกอีกครั้งหนึ่งรูปที่ 4.22 (c) แต่เมื่อเริ่มมีไอน้ำปนเข้ามาในถ้วยคว่ำ ถ้วยคว่ำก็จะลอยขึ้นอีกครั้งตามรูปที่ 4.22 (b) ทำงานวนกลับไปกลับมา

- 4.6.6.1 ข้อดีของกัดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ กัดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำทนทานต่อความดันสูง ๆ ใ้กับไอน้ำขนาดเล็ก ใ้ทนทานต่อการกระแทกของค้อนน้ำ ทนต่อการกัดกร่อน ชิ้นส่วนต่างชำรุดเสียหายยาก
- 4.6.6.2 ข้อเสียของกัดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ในการเริ่มทำงานเย็น (Cold start) จะต้องรอนานว่าจะปล่อยน้ำกลั่นตัวชุดแรกออก เพราะการเริ่มทำงานเย็นความดันเข้ามักจะน้อยมาก รูขนาดเล็กที่อยู่ด้านบนถ้วยจึงระบายอากาศไม่ทัน ถ้าทำรูระบายโตขึ้นจะทำให้ทำงานบ่อยเกินไปและมีไอน้ำ

ถูกปล่อยทิ้งมากขึ้น และต้องติดตั้งวาล์วกักเก็บก่อนกับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ เพื่อป้องกันการสูญเสีย
กำแพงน้ำที่ด้านนอกของถ้วยคว่ำ จนทำให้ถ้วยคว่ำแตกเปื้อนปล่อยไอน้ำทิ้งตลอดเวลา อันเนื่องจาก
มีความดันเปลี่ยนแปลงมากจนน้ำกลั่นตัวระเหยเป็นไอน้ำแฟรช หรือในการใช้งานกับไอชนิดยิ่ง ที่มี
พลังงานความร้อนในตัว (Enthalpy) สูง

- 4.6.6.3 **ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ** กับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำปล่อยน้ำกลั่นตัวออกตาม
ปริมาณของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามา แต่อาจจะทำงานได้ไม่ดีเท่ากับดักไอน้ำแบบลูกลอย จึงควร
เลือกใช้งานในเครื่องจักรที่ไม่จำเป็นต้องปล่อยน้ำกลั่นตัวหมดทุกครั้ง โดยถ้าไม่ปล่อยน้ำกลั่นตัวบ้าง
ก็ไม่ทำความเสียหายให้กับขบวนการผลิตมากนัก เพราะกับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำทนทานต่อการ
กระแทกของค้อนน้ำหรือการกัดกร่อน

4.6.7 กับดักไอน้ำชนิดเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic Group)



รูปที่ 4.23 งานในกับดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิก

กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกเป็นกับดักไอน้ำที่มีโครงสร้างง่ายๆ แข็งแรง แต่ยากที่จะทำ
ความเข้าใจในการทำงาน เพราะโครงสร้างที่ทำงานมีเพียงแผ่นเหรียญโลหะวงกลมเพียงแผ่นเดียว

ในการทำงานครั้งแรก น้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้ามาทางใต้ตรงกลางแผ่นเหรียญโลหะ จะดันให้แผ่น
เหรียญโลหะยกขึ้น น้ำกลั่นตัวจะไหลขึ้นจากรูเข้าตรงกลาง ออกไปที่รูทางออกที่อยู่รอบๆรูตรงกลางที่
อยู่ใต้ขอบของแผ่นเหรียญโลหะตามรูปที่ 4.23 (a)

เมื่อน้ำกลั่นตัวไหลออกไปหมด จะมีไอน้ำไหลมาแทน ความเร็วของไอน้ำที่ไหลจะสูงกว่า
ความเร็วของน้ำกลั่นตัว ทำให้ความดันที่ใต้แผ่นเหรียญโลหะลดลง (คล้ายด้านบนของปีกเครื่องบิน)
แผ่นเหรียญโลหะก็จะปิดลง ด้วยแรงของความดันด้านบนที่สูงกว่าความดันทางด้านใต้เหรียญตามรูป
ที่ 4.23 (b)

เมื่อเหรียญโลหะปิดตัวลง จะปิดทั้งรูเข้าและรูออกด้านใต้เหรียญ จึงมีไอน้ำถูกขังอยู่ในห้องที่อยู่ด้านบนของเหรียญโลหะ ความดันนี้จะกดบนเหรียญให้เหรียญปิดอยู่ตลอดเวลาตามรูปที่ 4.23 (b) เหรียญจึงปิดตัวเองตลอดไป แต่ไอน้ำจะมีการกลั่นตัวถ้าสูญเสียความร้อน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป ความดันในห้องด้านบนเหรียญที่กดเหรียญอยู่จะค่อยๆลดลงตามอัตราการสูญเสียความร้อนของไอน้ำ แรงผลักดันของน้ำกลั่นตัวที่ไหลเข้าสูงกว่าก็จะดันให้เหรียญยกขึ้นเปิดปล่อยน้ำกลั่นตัวออกไปอีกครั้งหนึ่งตามรูปที่ 4.23 (d)

- 4.6.7.1 ข้อดีของกับดักไอน้ำชนิดเทอร์โมไดนามิก ราคาต่ำเพราะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา โครงสร้างง่าย ๆ ทนทานต่อการกระแทกของก้อนน้ำ ชื่นส่วนต่างชำรุดเสียหายยาก ทนต่อการกัดกร่อน ใช้งานกับความดันสูงๆ และไอน้ำยังคงสามารถซ่อมบำรุงได้โดยไม่ต้องกับดักไอน้ำออกจากท่อ ไม่ต้องติดตั้งวาล์วกันกลับเพิ่ม เพราะเหรียญโลหะทำหน้าที่ปิดกั้นไม่ให้น้ำกลั่นตัวไหลกลับอยู่แล้ว
- 4.6.7.2 ข้อเสียของกับดักไอน้ำชนิดเทอร์โมไดนามิก มีการสูญเสียไอน้ำบ้างเพราะการปิดต้องอาศัยไอน้ำไหลเข้ามาปิด และทำงานได้ไม่ดีถ้าความดันเข้าต่ำมากหรือความดันออกสูงมาก ทำให้ความเร็วของไอน้ำใต้เหรียญโลหะต่ำจนไม่ค่อยยอมปิด ความดันเข้าไม่ควรต่ำกว่า 0.25 บาร์
- 4.6.7.3 ลักษณะการเลือกใช้งานกับดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิก กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกจะปล่อยน้ำกลั่นตัวออกเป็นจังหวะ เหมาะจะใช้ในการปล่อยน้ำกลั่นตัวออกจากระบบท่อไอน้ำ ไม่ควรเลือกใช้งานกับเครื่องจักร(เห็นแก่ราคาถูก) เพราะการเปิดไม่ได้ใช้หลักการสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำกลั่นตัว แต่ใช้หลักการของการสูญเสียความร้อนของกับดักไอน้ำแทน

4.6.8 การเลือกชนิดของกับดักไอน้ำมาใช้งาน

ในการเลือกชนิดของกับดักไอน้ำมาใช้งานนั้น ก่อนอื่นจะต้องเข้าใจหลักการทำงานของกับดักไอน้ำทุกชนิดก่อน เพื่อเข้าใจถึงธรรมชาติในการทำงาน(ปล่อยมาก ปล่อยน้อย ปล่อยต่อเนื่อง ปล่อยเป็นจังหวะ ใช้หลักการอะไรในการปล่อย)และข้อดีหรือจุดที่ต้องระวังในการใช้งานกับดักไอน้ำนั้น เพราะแม้ว่าเราจะเลือกกับดักไอน้ำชนิดหนึ่งมาใช้งานแล้ว เราอาจจะต้องติดตั้งให้ถูกต้องหรือต้องเพิ่มติดอุปกรณ์อื่นๆมาช่วยเช่น วาล์วกันกลับ ตัวปล่อยอากาศอัตโนมัติ(Automatic Air Vent) ตัวปล่อยระบายไอน้ำอัน(Steam Lock Release)

การเลือกใช้กับดักไอน้ำ ควรพิจารณาความเหมาะสมของเงื่อนไขต่าง ๆ ต่อไปนี้

- 4.6.8.1 ความดันไอน้ำสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้งาน
- 4.6.8.2 อุณหภูมิใช้งานสูงสุด
- 4.6.8.3 ปริมาณน้ำคอนเดนเสทที่ปล่อยออก
- 4.6.8.4 ความเปลี่ยนแปลงของความดันภายในระบบ
- 4.6.8.5 ขนาด
- 4.6.8.6 เงื่อนไขการติดตั้ง
- 4.6.8.7 โลหะที่ใช้ทำตัวเครื่องดักไอน้ำ
- 4.6.8.8 ชนิดของเครื่องดักไอน้ำ
- 4.6.8.9 ความเหมาะสมกับเครื่องจักร

ตารางที่ 4.6 สรุปลักษณะการทำงานของก๊ับดักไอน้ำ

ก๊ับดักไอน้ำ	รูปแบบการระบายออกตามปกติ
รูออริฟิคหรือวาล์วปรับ	ภาระน้อยปล่อยไอทิ้ง/ภาระมากปล่อยน้ำไม่ทัน
ความดันสมดุล	ระบายออกสม่ำเสมอ มีไออ์ออกเล็กน้อยก่อนวาล์วปิด
การขยายตัวของของเหลว	ระบายออกสม่ำเสมอและปรับได้ มีไออ์ออกน้อยก่อนวาล์วปิด
โลหะสองชนิด	ระบายออกสม่ำเสมอ แต่ถ้าติดตั้งไม่ถูกต้องหรือภาระผันแปรมาก จะมีไออ์พุ่งออกพอสมควรก่อนปิด
ลูกลอยอิสระ/ลูกลอยมีก้าน	ระบายตามปริมาณของน้ำกลั่นตัว
ถ้วยคว่ำ/ถ้วยหงาย	พ่นแรงตามปริมาณน้ำ เริ่มทำงานช้าในครั้งแรก
เทอร์โมไดนามิก	พ่นแรงเป็นจังหวะ มีไออ์ออกเล็กน้อยก่อนวาล์วปิด

4.7 เอกสารอ้างอิง

- 4.7.1 วิธีวิธี อิงภากรณ์, การออกแบบระบบท่อภายในอาคาร, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2549
- 4.7.2 American Society of Mechanical Engineers, ASME, Section I, Boiler & Pressure Vessel Code, 2004
- 4.7.3 American Society of Mechanical Engineers, ASME, Section II, Materials, 1995.
- 4.7.4 Reno C. King, Piping Handbook, McGraw-Hill Book Company, Inc.,1973.
- 4.7.5 Spirax-Sarco, Design of fluid System: Hook-Ups, 2004

4.8 ตารางและรูปภาพท้ายบท

ตารางที่ 4.7 การเลือกชนิดของกักไอน้ำตามชนิดของอุปกรณ์การใช้ไอน้ำ

Steam trap:	FT range (float- thermostatic)	FT-C (float- thermostatic with steam release)	TD range (Thermodynamic)	BPT (Balanced pressure thermostatic)	SM (Bimetallic)	No.8 (Liquid expansion)	IB range (Inverted bucket)
-------------	---	---	--------------------------------	---	--------------------	-------------------------------	-------------------------------------

Presses

Multi-platen presses (parallel connections)	B		A ⁶				
Multi-platen presses (series connections)			A ^{1, 6}				
Tyre presses	B		B ¹	A			B ¹

Process equipment

Boiling pans - fixed	A	B	B ¹	B			
Boiling pans - tilting	B	A					
Retorts	A						
Industrial autoclaves	A						B ¹
Digesters	A ¹		B ¹				
Hot tables	B		B ⁶	A ²			
Brewing coppers	A ¹	B					
Evaporators, calandrias	A ¹	B					B ¹
Vulcanisers	A		B ¹ (pocket entry)				B ¹

Space heating equipment

Calorifiers	A ⁶						
Heater batteries	A ⁶						
Radiant panels and strips	A	B ¹	B ¹				B ¹
Radiators and convection cabinets	B			A	B		
Unit heaters and air batteries	A ⁶						
Overhead pipe coils	B			A			B ¹

Steam mains

Pressure reducing valve station	A			B ⁵			
Horizontal runs	B		A				B
Shutdown drain (frost protection)				B ¹	B	A	
Separators	A		B				B
Steam header drainage	A		B ⁶				B
Terminal ends	B		A ¹				B ¹

Tanks and vats

Process vats (rising discharge pipe)	B	B	A	B ⁵			B
Process vats (discharge pipe at base)	A		B ⁶	B ⁵			
Small coil heated tanks (quick boiling)	A			B ⁵			
Small coil heated tanks (slow boiling)					B	A	

Canteen Equipment

A - Best choice, B - Acceptable alternative, ¹ (parallel air vent), ² (with 1 m cooling leg), ⁵ ('near-to-steam' capsule).

Application	Ball float- thermostatic	Ball float FT-C	Thermodynamic	Balanced pressure	Bimetallic	Liquid expansion	Inverted bucket
Boiling pans - tilting		B		A ^{2, 5}			
Boiling pans - fixed	A	B	B ¹	B			
Boiling pans - pedestal	B			A ^{2, 5}			
Steaming ovens				A ^{2, 5}			
Hotplates	B			A ^{2, 5}			

Key:

A - Best choice.

B - Acceptable alternative.

¹ - With air vent in parallel.

² - At end of unlagged cooling leg. Minimum length 1 m.

³ - Use special tracing traps which offer fixed temperature discharge option.

⁴ - If the equipment is temperature controlled, a condensate pump and trap combination may be required.

⁵ - With close to steam temperature capsule.

⁶ - Fitted with anti-air-binding disc.

ตารางที่ A1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ, y

	Temperature, °F (°C)							
	900 (480) and below	950 (510)	1,000 (540)	1,050 (565)	1,100 (595)	1,150 (620)	1,200 (650)	1,250 (675) and above
Ferritic	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
Alloy 800, 801	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
800H, 800HT	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
825	0.4	0.4	0.4	...	...	...	...	...
230 Alloy	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
N06045	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
N06600	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	...
N06601	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	...
N06690	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	...
Alloy 617	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
S31803	0.4	...	...	...	...	...	...	...

ตารางที่ A2 แสดงค่าคงที่ต่ำสุดที่ใช้สำหรับการต่อแบบต่างๆ, C

Type of Pipe	Value of C^b , in. (mm)
Threaded steel, or nonferrous pipe ^a	
$\frac{3}{4}$ in. (19 mm) nominal, and smaller	0.065 (1.65)
1 in. (25 mm) nominal and larger	Depth of thread h^c
Plain end ^d steel, or nonferrous pipe	
$3\frac{1}{2}$ in. (89 mm), nominal and smaller	0.065 (1.65)
4 in. (100 mm), nominal and larger	0

หน่วยที่ 5 ฉนวน

ในระบบการผลิตที่ใช้ไอน้ำเป็นส่วนประกอบ ไอน้ำที่ผลิตได้จะถูกส่งไปยังส่วนต่างๆ ของระบบการผลิตโดยผ่านท่อไอน้ำ ตัวหม้อน้ำและท่อไอน้ำ จำเป็นจะต้องป้องกันมิให้เกิดการสูญเสียความร้อนไปจากไอน้ำ เพราะจะทำให้อุณหภูมิของไอน้ำลดลง ไม่อาจใช้งานได้เต็มที่และต้องใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้เพิ่มขึ้นจึงจะได้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิที่ต้องการ การป้องกันการสูญเสียความร้อนในระบบไอน้ำทำได้ง่าย ๆ โดยการหุ้มฉนวนป้องกันความร้อนให้กับหม้อไอน้ำ ระบบท่อ และอุปกรณ์

5.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกฉนวน ชนิดฉนวนป้องกันความร้อนให้เหมาะสมกับหม้อไอน้ำ ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ และระบบท่อไอน้ำ ให้ประหยัดเชิงเศรษฐศาสตร์ตลอดอายุในการทำงานและมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.2 ขอบเขตและนิยาม

5.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะฉนวนป้องกันความร้อนเพื่อให้เหมาะสมกับงานของระบบหม้อไอน้ำ เพื่อให้เกิดประโยชน์และประหยัดพลังงาน และอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น โดยเฉพาะงานระบบอุตสาหกรรม โรงแรม หรือโรงพยาบาลทั่วไป

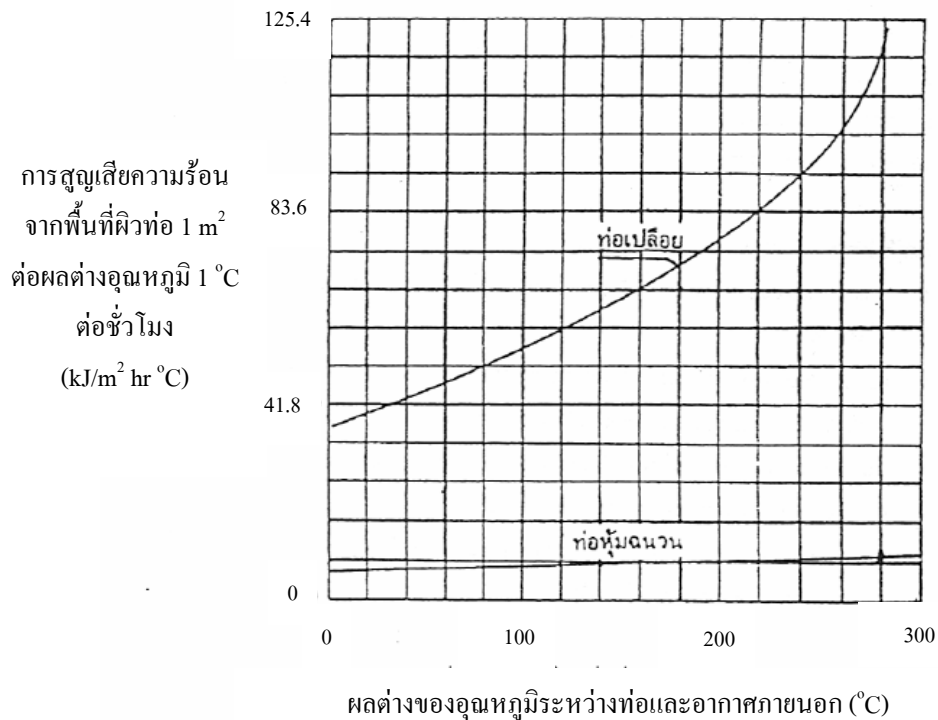
5.2.2 นิยาม

ฉนวนป้องกันความร้อน (Thermal Insulator) หมายถึง วัสดุที่ต้านทานหรือป้องกันมิให้พลังงานความร้อนส่งผ่านจากผนังด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผนังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่น ไม่ให้ความร้อนจากหม้อไอน้ำหรือท่อไอน้ำออกสู่ภายนอกได้

5.3 ความจำเป็นของฉนวนป้องกันความร้อน

จุดประสงค์ของการใช้ฉนวน ก็เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งอุณหภูมิต่ำกว่า หรือกล่าวอีกในหนึ่งว่าการใช้ฉนวนเพื่อรักษาอุณหภูมิและช่วยลดการใช้พลังงาน อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการป้องกันการเกิดไอน้ำกลั่นตัวบนผิวโลหะ เช่นในระบบทำความเย็น เป็นต้น

ในระบบความร้อนจะพบว่า ท่อและอุปกรณ์ที่หุ้มฉนวนที่มีความหนาเหมาะสม จะสูญเสียความร้อนน้อยกว่าท่อและอุปกรณ์ที่ไม่ได้หุ้มฉนวนค่อนข้างมาก ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ปริมาณการสูญเสียความร้อนจากผิวท่อเปลือยและท่อหุ้มฉนวน

ผลต่างของอุณหภูมิของเส้นโค้งทั้งสอง เป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปสู่บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์ หรือเป็นความร้อนที่สามารถเก็บไว้ใช้ได้โดยการหุ้มฉนวน ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากท่อเปลือยขนาดต่างๆ ที่มีไอน้ำอิ่มตัวอยู่ภายใน เช่นท่อขนาด 60 mm ที่อุณหภูมิอิ่มตัว 160 °C หรือความดันประมาณ 6.3 Bar จะมีความร้อนสูญเสียไป 1985.5 kJ (475 kcal/hr) ต่อความยาว 1 m เป็นต้น

5.4 การเลือกใช้ฉนวนป้องกันความร้อน

ฉนวนป้องกันความร้อนเป็นวัสดุที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อนในระบบไอน้ำ และยังทำให้ระบบท่อและรอบๆ อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำไม่ร้อน ลดอันตรายจากการที่คนหรือพนักงานไปจับหรือแตะต้องท่อหรืออุปกรณ์ ฉนวนป้องกันความร้อนที่ใช้มีหลายชนิด หลายราคา ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฉนวนและลักษณะงานที่จะนำไปใช้

หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้ฉนวนป้องกันความร้อน

- 5.4.1 มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ต่ำหรือค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance, R) สูง
- 5.4.2 ไม่ติดไฟหรือลุกไฟ ทนอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดสำหรับฉนวนชนิดนั้นๆ ได้
- 5.4.3 ไม่ซบหรืออมน้ำ และทนต่อความชื้น ด้านทานต่อกรด แอมโมเนีย ได้ เป็นต้น
- 5.4.4 ทนต่อแรงดึง แรงอัด และการสั่นสะเทือน โดยไม่เสื่อมสภาพหรือแปรรูป
- 5.4.5 ติดตั้งสะดวก ดูแลรักษา และซ่อมแซมง่าย
- 5.4.6 มีสภาพความเป็นฉนวนคงที่ ไม่กักความร้อน หรือมีอายุการใช้งานยาวพอสมควร
- 5.4.7 มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง

- 5.4.8 ลดความมีเสียงดังภายในลงได้
- 5.4.9 ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้
- 5.4.10 มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย

5.5 วัสดุที่ใช้ในการทำฉนวน

ตามปกติวัสดุกันความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 500 °C เรียกว่า ฉนวนความร้อน ถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงกว่านี้จะเรียกว่า วัสดุกันความร้อน วัสดุที่ใช้ทำฉนวนกันความร้อนมีทั้งแบบสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ การกันความร้อนเกิดขึ้นได้ โดยอากาศที่แทรกอยู่ตามช่องว่างในโครงสร้าง ลักษณะคล้ายฟองน้ำของตัววัสดุฉนวนเอง

วัสดุที่ใช้ทำฉนวนแบ่งออกเป็น 5 พวกใหญ่ๆ คือ

- 5.5.1 Flake Insulator ฉนวนชนิดนี้มีลักษณะเป็นปุย เม็ดเล็กๆ เพื่อแยกอากาศ ทำให้ความร้อนผ่านไปได้ยาก เช่น ไมก้า
- 5.5.2 Fibrous Insulation ฉนวนชนิดนี้มีทั้งเป็นสารอินทรีย์ เช่น ไม้ หรือซานอ้อย และทำจากสารอนินทรีย์ เช่น โยแก้ว โยหิน โยเซอรามิก Rock Wool, Alumina, และ Asbestos เป็นต้น
- 5.5.3 Granular Insulation ฉนวนชนิดนี้ทำจากวัสดุพวกโฟมต่างๆ และ Calcium Silicate เป็นต้น
- 5.5.4 Cellular Insulation ฉนวนชนิดนี้ทำจากพวกแก้ว ขางและพลาสติก
- 5.5.5 Reflective Insulation ฉนวนชนิดนี้ทำจากแผ่น sheet บางๆ หรือฟอยล์ซึ่งทำจากอลูมิเนียม หรือ Stainless Steel เพื่อที่จะสะท้อนความร้อนให้ย้อนกลับ เช่น ฟิล์มกรองแสง อลูมิเนียมฟอยล์

5.6 คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อน

วัสดุฉนวนมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และการเป็นฉนวนที่แตกต่างกัน เช่นค่าการนำความร้อน และอุณหภูมิสูงสุดของฉนวนที่ทนได้ คุณสมบัติทั้งสองประการนี้ยังเป็นตัวแปรของราคาที่แตกต่างกันด้วย

5.6.1 คุณสมบัติของโยแก้ว (Glass Wool)

5.6.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

- (ก) เป็นวัสดุสีเหลืองหรือขาว
- (ข) รูปร่าง ความหนา สัดส่วนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง หยุนตัวได้ถึง 90%
- (ค) ไม่ติดไฟ ไม่ดูดซึมน้ำ และความชื้น
- (ง) น้ำหนักเบา ความหนาแน่น 10-48 kg/m³ สำหรับแบบม้วนและแผ่น ถ้าเป็นท่อสำเร็จรูป ความหนาแน่น 56-100 kg/m³
- (จ) ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบด้วยโยแก้วเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยประมาณ 4-9 ไมครอน และยาวแต่ละเส้น 150-220 มม

5.6.1.2 คุณสมบัติทางเคมี

- (ก) ทนต่อกรด ด่าง และการกัดกร่อนของสารต่างๆ ได้ดี
- (ข) ไม่มีสารคลอไรด์ปน และไม่เปื้อนพิษต่อคน
- (ค) ไม่ละลายน้ำและสารเคมีอื่น

- (ง) ไม่เกิดเชื้อรา และไม่ถูกทำลายด้วยแมลงและสัตว์
- (จ) คุณสมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลงตลอดอายุการใช้งาน

5.6.1.3 คุณสมบัติทางฉนวน

- (ก) โยแก้วไม่มีเรซินทนความร้อน ได้สูงถึง 540°C
- (ข) โยแก้วเหลือชนิดมีเรซินทนความร้อน ได้ -150°C ถึง 350°C
- (ค) โยแก้วขาวมีเรซินทนความร้อนได้ถึง 370°C
- (ง) มีค่าความต้านทานความร้อน (R) 27-32 m.K/W ต่อความหนา 25.4 mm
- (จ) มีค่าการนำความร้อน (k) 0.031-0.037 W/m.K

5.6.2 คุณสมบัติของใยหิน (Rock Wool)

5.6.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

- (ก) เป็นวัสดุสีน้ำตาลปนเขียวอ่อน
- (ข) รูปร่าง ความหนา สัดส่วนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง
- (ค) ไม่ติดไฟ ทนอุณหภูมิสูง 800°C เป็นเวลา 30 นาที และไม่ดูดซับน้ำ
- (ง) น้ำหนักเบาปานกลาง ความหนาแน่น 48-400 kg/m³
- (จ) ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบด้วยใยหินเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นหินประมาณ 5-10 ไมครอน และยาวแต่ละเส้น 50-100 mm

5.6.2.2 คุณสมบัติทางเคมี

- (ก) ทนต่อกรด ด่าง และการกัดกร่อนของสารต่างๆ ได้พอสมควร
- (ข) มีสารคลอไรด์ได้ไม่เกิน 10 ppm ตาม ASTM D-512
- (ค) ไม่ละลายน้ำและไม่ดูดซับน้ำ
- (ง) คุณสมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลงตลอดอายุการใช้งาน

5.6.2.3 คุณสมบัติทางฉนวน

- (ก) ใยหินไม่มีสารเรซินทนความร้อน ได้สูงถึง 1000°C
- (ข) ใยหินม้วนและแผ่นทนความร้อน ได้ 100-550°C
- (ค) ใยหินสำเร็จรูปทนความร้อนได้ถึง 100-550°C
- (ง) มีค่าการนำความร้อน (k) 0.044-0.165 W/m.K

พึงสังเกตว่า โยแก้วและใยหินมีความแตกต่างกันที่โครงสร้างของเส้นใย โยแก้วเกิดจากเส้นใยที่ยาวกว่า จึงแข็งแรงกว่า สามารถลดความหนาแน่นลงได้ต่ำ ตั้งแต่ 10-48 kg/m³ ในขณะที่เส้นใยหินเป็นเส้นใยสั้น จำเป็นต้องเพิ่มความหนาแน่นตั้งแต่ 48-400 kg/m³ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับฉนวน

5.6.3 คุณสมบัติของแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

5.6.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

- (ก) สามารถใช้งานได้ถึงอุณหภูมิสูงสุด 650 °C
- (ข) ความหนาแน่น 190-230 kg/m³

- (ค) ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งเข้ารูป 354 kN/m²
- (ง) ความแข็งแรงต่อแรงอัดเป็นดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงความแข็งแรงต่อแรงอัด

อุณหภูมิ	ความหนาผลด	แรงอัด
°C	%	kN/m ²
400	1.5	690
500	1.6	690
600	1.7	620

- (จ) มีค่าการนำความร้อน (k) เป็นดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าการนำความร้อน (k)

อุณหภูมิ	ค่าการนำความร้อน (k)
°C	W/m.K
50	0.052
100	0.056
150	0.061
200	0.066
250	0.072
300	0.078
350	0.085

หัดตัวที่ 650°C 1.3-1.6%

5.6.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

- (ก) ทนต่อกรด ด่าง และการกัดกร่อนของสารต่างๆ ได้ดี
- (ข) ไม่มีสารคลอไรด์ปน และไม่เป็นพิษต่อคน
- (ค) ไม่ละลายน้ำและสารเคมีอื่น
- (ง) ไม่เกิดเชื้อรา และไม่ถูกทำลายด้วยแมลงและสัตว์
- (จ) คุณสมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลงตลอดอายุการใช้งาน

5.6.3.3 คุณสมบัติทางฉนวน

- (ก) แคลเซียมซิลิเกตประกอบด้วยเนื้อทรายและปูนเป็นตัวประกอบ จึงเป็นเซลแบบเปิด ที่มีที่ว่างของรูอากาศระหว่างเซล เป็นตัวฉนวนได้ดี

- (ข) ทนอุณหภูมิได้สูง 650 °C
- (ค) มีค่าการนำความร้อน (k) 0.052-0.085 W/m.K
- (ง) มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ 0.84 kJ/kg.K

5.6.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนและจุดเด่นในการใช้งาน แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนและจุดเด่นในการใช้งาน

ชื่อของวัสดุฉนวน	ประเภท	อุณหภูมิ ที่ใช้งาน ปลอดภัย (°C)	ค่าการนำความร้อน (kcal/m.h°C)	จุดเด่น
วัสดุฉนวนแอสเบส ตอส (Asbestos)	ฉนวนทรงกระบอก หมายเลข 1 ฉนวนแผ่น หมายเลข 2 ผ้าห่มทนความร้อน เชือกฉนวน	550 350 400	ไม่เกิน 0.053-0.056 ไม่เกิน 0.048-0.053 ไม่เกิน 0.055-0.065	การติดตั้งสะดวก เหมาะสม กับบริเวณที่สันตะเทือน การติดตั้งสะดวก สามารถ ถอดได้ เหมาะสมกับวาล์ว หน้าแปลน
วัสดุฉนวนใยหิน (Rock Wool)	ฉนวนแผ่น ฉนวนทรงกระบอก ฉนวนแถบ	400-600	ไม่เกิน 0.039-0.048	เหมาะสมกับอุณหภูมิสูงใช้ เป็นฉนวนของหม้อไอน้ำ ถัง ท่อ และทางไฟ เป็นต้น
วัสดุฉนวน Diatomaceous Earth	ใส่เส้นใยพืช ใส่แอสเบสตอส	250 500	ไม่เกิน 0.062-0.097 ไม่เกิน 0.083-0.097	วัสดุฉนวนแบบปั้น
วัสดุฉนวนใยแก้ว (Glass Wool)	ฉนวนแผ่น หมายเลข 1 8K-24K หมายเลข 2 10K-96K หมายเลข 3 96K ฉนวนทรงกระบอก หมายเลข 1 ฉนวนแถบ	300-350	ไม่เกิน 0.054-0.040 ไม่เกิน 0.057-0.036 ไม่เกิน 0.040 ไม่เกิน 0.037 ไม่เกิน 0.045	เป็นวัสดุฉนวนที่นิยมใช้กัน มากที่สุด ค่าการนำความ ร้อนต่ำ ความสามารถในการ รักษาอุณหภูมิดี
วัสดุฉนวนเค ลเซียมซิลิเกต	ฉนวนแผ่น หมายเลข 1 ฉนวนทรงกระบอก หมายเลข 2	650	ไม่เกิน 0.053 ไม่เกิน 0.065	มีความแข็งแรงมาก ถ้าทำ เป็นแบบสำเร็จรูปการติดตั้ง และความทนทานไม่ดี

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนและจุดเด่นในการใช้งาน (ต่อ)

ชื่อของวัสดุฉนวน	ประเภท	อุณหภูมิ ที่ใช้งาน ปลอดภัย (°C)	ค่าการนำความร้อน (kcal/m.h °C)	จุดเด่น
วัสดุฉนวน Pearlite	ฉนวนแผ่น หมายเลข 1 ฉนวนทรงกระบอก หมายเลข 2	650	ไม่เกิน 0.053	

5.7 การหาค่าความร้อนสูญเสียและความหนาฉนวนที่เหมาะสม

การหุ้มฉนวนหนาๆ ย่อมป้องกันการสูญเสียความร้อนได้มากก็จริง แต่ในขณะเดียวกันก็เสียค่าใช้จ่ายในการหุ้มฉนวนเพิ่มขึ้น กรณีที่ฉนวนหนาเกินไปจะเสียค่าใช้จ่ายไม่คุ้มกับค่าพลังงานที่ประหยัดได้ และกรณีที่หุ้มฉนวนบางเกินไปพลังงานความร้อนก็จะสูญเสียไปอย่างน่าเสียดาย ดังนั้นควรหาความหนาที่เหมาะสมคุ้มค่าการลงทุนจึงจะเหมาะสมต่อการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ

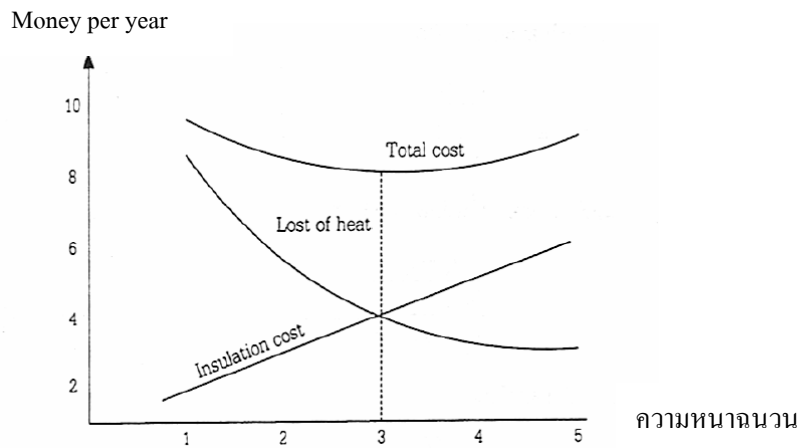
การสูญเสียความร้อนจะแปรตามปัจจัยดังนี้

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| ก) ขนาดท่อ | ฉ) อุณหภูมิภายในท่อ |
| ข) ชั่วโมงการใช้งานต่อปี | ซ) ความหนาฉนวน |
| ค) ราคาเชื้อเพลิง | ฅ) ชนิดฉนวน |
| ง) อุณหภูมิภายนอก | จ) การนำความร้อนของฉนวน |
| ฉ) อุณหภูมิผิวท่อ | ๗๗ |

ราคาของฉนวนจะแปรตามปัจจัยดังนี้

- | | |
|-------------------------|-------------|
| ก) ราคาวัสดุครอบฉนวน | ค) ราคาฉนวน |
| ข) อายุการใช้งานของฉนวน | ง) ค่าแรง |
| ๗๗ | |

ทั้งนี้การหาความหนาที่เหมาะสมของฉนวนนั้นให้คำนวณจากต้นทุนที่ต่ำสุดในการลงทุน โดยต้นทุนนั้นประกอบด้วย (1) ต้นทุนจากราคาของฉนวนที่ความหนาต่างๆ และ (2) ต้นทุนจากมูลค่าความร้อนที่สูญเสีย โดยนำต้นทุนทั้งสองที่ความหนาฉนวนต่างๆมาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ความหนาของฉนวนที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์

มูลค่าความร้อนที่สูญเสียไป ในการคำนวณโดยทั่วไปจะถือว่า ผิวนอกของภาชนะ เช่น หม้อไอน้ำ ท่อไอน้ำ มีอุณหภูมิเท่ากับของเหลวที่อยู่ภายใน อาจจะไม่ถูกต้องนัก แต่เป็นหลักการที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม และง่ายต่อการคำนวณ ค่าอัตราความร้อนที่ไหลผ่านด้วยวิธีนี้จะมากกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย

5.7.1 สำหรับผนังเรียบหรือผิวโค้งใหญ่ๆ

ในการคำนวณในที่นี้กำหนดความหมายของอักษรย่อต่างๆดังนี้

Q = อัตราปริมาณความร้อนสูญเสีย, W

T_v = อุณหภูมิผิวภาชนะ, °C

T_a = อุณหภูมิอากาศภายนอก, °C

T_s = อุณหภูมิผิวนอกของฉนวน, °C

T_j = อุณหภูมิระหว่างผิวท่อ, °C

L = ความหนาของฉนวน, m

L_1 = ความหนาของฉนวนชั้นใน, m

L_2 = ความหนาของฉนวนชั้นนอก, m

k = ค่าการนำความร้อนของฉนวน, W/m.K

k_1 = ค่าการนำความร้อนของฉนวนชั้นใน, W/m.K

k_2 = ค่าการนำความร้อนของฉนวนชั้นนอก, W/m.K

$L/k = R$ = ค่าความต้านทานความร้อน, m².K/W

$1/h_v$ = ค่าความต้านทานความร้อนผิวนอก, m².K/W

h_v = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกสุด, W/m².K

โดยใช้สูตรการคำนวณแล้วแต่กรณี

5.7.1.1 ฉนวนป้องกันความร้อนชั้นเดียว

$$Q = \frac{T_v - T_a}{\frac{L}{k} + \frac{1}{h_v}} \quad (5-1)$$

5.7.1.2 ฉนวนป้องกันความร้อน 2 ชั้น เป็นฉนวนคนละชนิด

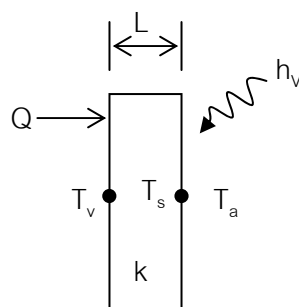
$$Q = \frac{T_v - T_a}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_v}} \quad (5-2)$$

5.7.1.3 อุณหภูมิที่ระหว่างผิวต่อ

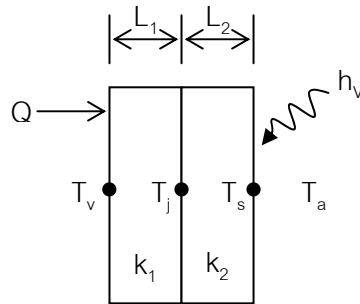
$$T_j = T_v - \frac{QL_1}{k_1} \quad (5-3)$$

5.7.1.4 อุณหภูมิที่ผิวนอกสุด

$$T_s = \frac{Q}{h_v} + T_a \quad (5-4)$$



รูปที่ 5.3 แสดงฉนวนป้องกันความร้อนชั้นเดียว



รูปที่ 5.4 แสดงฉนวนป้องกันความร้อนสองชั้น โดยฉนวนคนละชนิด

5.7.2 สำหรับท่อและถังทรงกระบอก

กำหนดความหมายของอักษรย่อ

Q' = ความร้อนสูญเสียต่อหน่วยความยาวท่อ

T_p = อุณหภูมิผิวท่อ, °C

T_a = อุณหภูมิอากาศภายนอก, °C

T_s = อุณหภูมิผิวนอกของฉนวน, °C

T_j = อุณหภูมิระหว่างผิวท่อ, °C

k = ค่าการนำความร้อนของฉนวน, W/m.K

k_1 = ค่าการนำความร้อนของฉนวน (ผิวชั้นใน), W/m.K

k_2 = ค่าการนำความร้อนของฉนวน (ผิวชั้นนอก), W/m.K

d_s = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฉนวน, m

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ, m

d_j = เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างผิวในและนอก, m

h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกสุด, W/m².K

$\ln$ = $2.303 \log_{10}$

π = 3.1416

ใช้สูตรการคำนวณ แล้วแต่กรณีดังนี้

5.7.2.1 ฉนวนป้องกันความร้อนชั้นเดียว

$$Q' = \frac{\pi(T_p - T_a)}{\frac{1}{2k} \ln\left(\frac{d_s}{d_p}\right) + \frac{1}{h_v d_s}} \quad (5-5)$$

5.7.2.2 ฉนวนป้องกันความร้อน 2 ชั้น และต่างวัสดุกัน

$$Q' = \frac{\pi(T_p - T_a)}{\frac{1}{2k_1} \ln\left(\frac{d_j}{d_p}\right) + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{d_s}{d_j}\right) + \frac{1}{h_v d_s}} \quad (5-6)$$

5.7.2.3 อุณหภูมิที่ระหว่างผิวท่อ

$$T_j = T_p + \frac{Q' \ln\left(\frac{d_j}{d_p}\right)}{2\pi k_1} \quad (5-7)$$

5.7.2.4 อุณหภูมิที่ผิวนอกสุด

$$T_s = \frac{Q'}{\pi d_s h_v} + T_a \quad (5-8)$$

มูลค่าของฉนวนก็หาได้ตามความหนาของฉนวน เช่นเดียวกันกับการหาค่าความร้อนสูญเสีย ซึ่งสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ 2 เส้น คือ Lost of heat และ Insulation Cost ซึ่งเส้นสองเส้นจะตัดกันที่ตำแหน่งหนึ่ง จากนั้นหาเส้น Total Cost ของทั้งสองเส้น จุดต่ำสุดของเส้น Total Cost จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมของฉนวนในเชิงเศรษฐศาสตร์ ทำให้ทราบได้ว่าควรหุ้มฉนวนหนาเท่าใด รวมทั้งเงินลงทุน และอื่นๆ อีกด้วย อันจะทำให้การสูญเสียความร้อนอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับเศรษฐศาสตร์ปัจจุบัน อันเป็นผลถึงการประหยัดพลังงาน ต้นทุนการผลิตต่ำ และการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพด้วย

5.8 การติดตั้งฉนวนป้องกันความร้อน

เนื่องจากวัสดุฉนวนมีทั้งแบบเป็นผง เป็นแผ่นหรือท่อและเป็นม้วน การติดตั้งก็มีกรรมวิธีที่แตกต่างกันออกไป

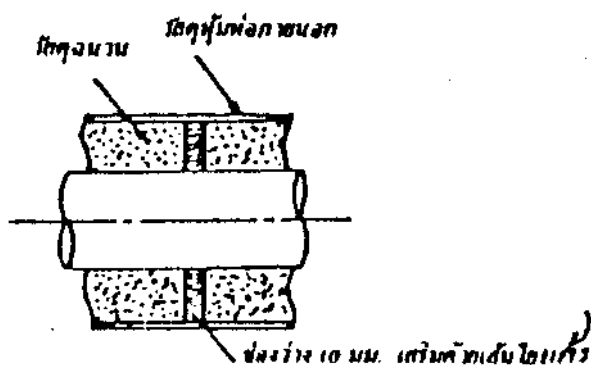
- 5.8.1 ชนิดเป็นผง ผู้ใช้ต้องนำมาผสมเอง เช่น Diatomaceous Earth หรือ แคลเซียมซิลิเกตผง กรรมวิธีการติดตั้งค่อนข้างยุ่งยาก ต้องอาศัยความสามารถหรือความชำนาญของผู้ติดตั้งในการหล่อให้ได้ขนาดของงาน ที่สำคัญคือต้องรักษาความหนาของฉนวนให้เท่ากันตลอด และเมื่อติดตั้งแล้วอาจแตกร้าวหรือหลุดเนื่องจากต้องผสมน้ำ เมื่อแห้งเป็นธรรมชาติจะเกิดการหดตัวได้ จึงเป็นการยากมากทีเดียว
- 5.8.2 ชนิดเป็นแผ่นหรือท่อสำเร็จรูป เช่นใยแก้วที่ทำเป็นท่อสำเร็จรูปแกะออกได้เลย หรือแคลเซียมซิลิเกตที่เป็น 2 ฝาหรือมากกว่า นำมาประกบกันได้เลย สะดวกและง่าย เป็นที่นิยมใช้กันมาก
- 5.8.3 ชนิดเป็นผืนหรือม้วน ใช้กับงานที่เป็นถังหรือกระบอกใหญ่ เช่นหม้อไอน้ำ ถังเย็นหรือร่อน เป็นชนิดที่ติดตั้งง่าย ปูทับกัน อาศัยตัวยึดที่เตรียมไว้เป็นช่วงๆ เพื่อรักษารูปให้อยู่ตลอดเวลา

5.9 ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้ฉนวน

5.9.1 ในการหุ้มฉนวนท่อและอุปกรณ์ความร้อนต่างๆจำเป็นต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้เป็นเบื้องต้น คือ

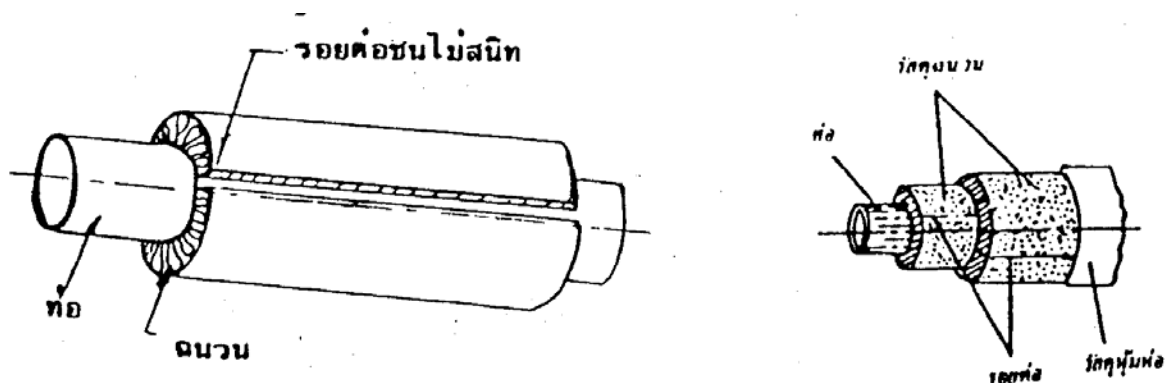
5.9.1.1 ความชื้นของบรรยากาศและที่ตั้งของงาน ฉนวนที่นำมากั้นความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆ ต้องคำนึงถึงความชื้นด้วย เพราะอาจจะเกิดหยดน้ำรอบฉนวนที่ติดตั้งได้

5.9.1.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและการหดตัวของฉนวน โดยตรงรอยต่อของวัสดุฉนวนที่มีความยาวมากๆ จะเกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของท่อ วิธีแก้ปัญหามองช่องว่างนี้ทำได้โดยการใส่ฉนวนใยแก้วเสริมอยู่ที่ทุกรอยต่อของวัสดุฉนวน ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและการหดตัวของฉนวน

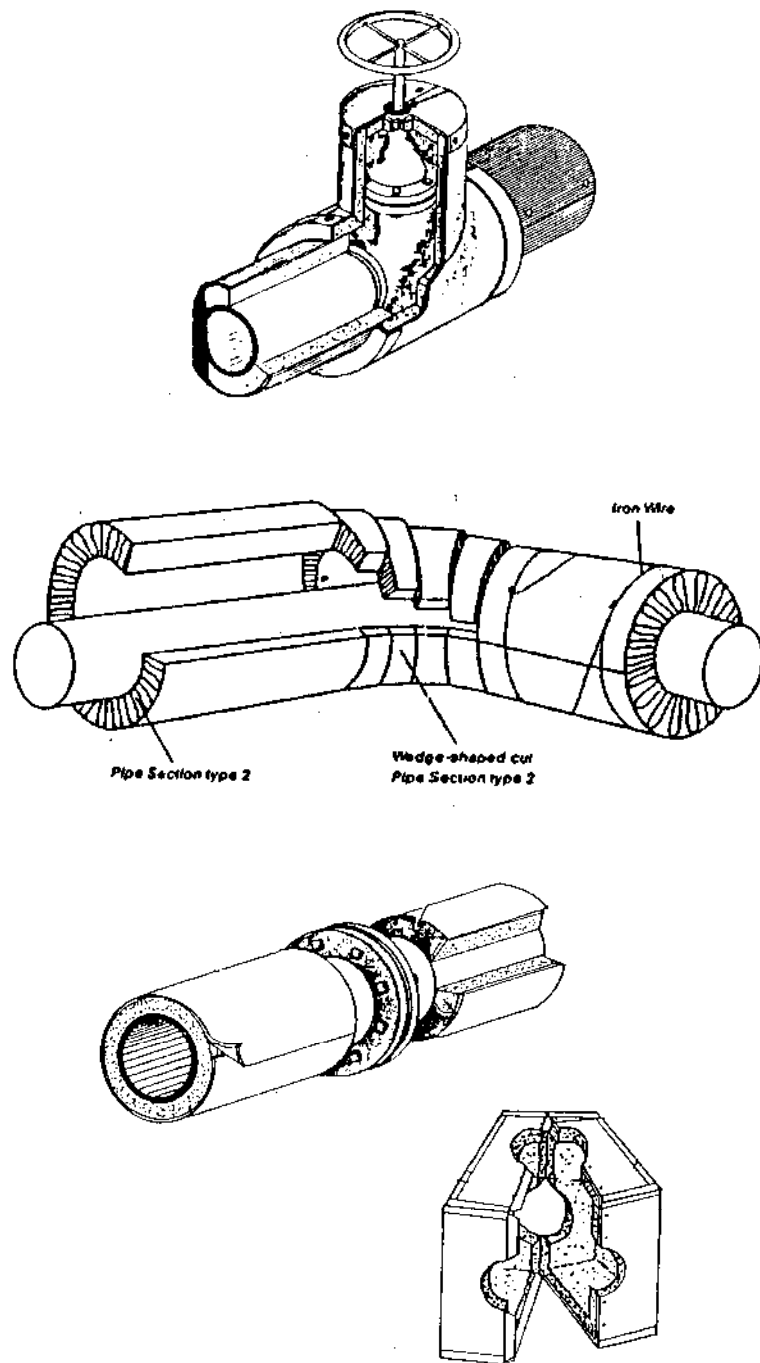
5.9.1.3 การวางแผนต่อตามความยาวของท่อและถัง สำหรับฉนวนสำเร็จรูปที่มีรอยต่อตามยาวควรให้รอยต่อทั้งสองชนกันพอดี ไม่ควรทิ้งให้เป็นช่องว่างดังรูป การวางตำแหน่งของรอยต่อมักจะต่อที่ 16:00 น. ถ้าเป็นการหุ้มฉนวนสองชั้น รอยต่อชั้นในมักจะต่อที่ 14:00 น. ส่วนรอยต่อชั้นนอกมักจะต่อที่ 16:00 น. ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงรอยต่อชนที่ไม่สนิทตามแนวยาวของท่อ

5.9.1.4 การป้องกันน้ำจากภายนอก (น้ำฝน)

5.9.1.5 ควรหุ้มฉนวนตามวาล์ว หน้าแปลน และข้อต่อต่างๆ เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้จะสูญเสียความร้อนหากปล่อยทิ้งไว้ไม่หุ้มฉนวน วิธีป้องกันคือทำเป็นกล่องสำเร็จรูปที่เปิดปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงการหุ้มฉนวนตามวาล์ว หน้าแปลน และข้อต่อต่างๆ

5.9.1.6 การรักษาความหนาและแนวป้องกันความร้อน

5.9.1.7 การสูญเสียความร้อนไปกับอุปกรณ์แขวนหรือติดตั้ง

5.9.2 ท่อและอุปกรณ์ความร้อน แม้ได้รับการติดตั้งฉนวนกันความร้อนอย่างถูกต้อง และสมบูรณ์แบบแล้วก็ตาม ความร้อนยังสูญเสียได้จากท่อและอุปกรณ์ไปเพียงแต่น้อยลงหรือน้อยที่สุด แต่คงไม่อาจป้องกันมิให้การสูญเสียเลย เพราะว่า

- 5.9.2.1 ความร้อนจากไอน้ำสูญเสียโดยการถ่ายเทไปยังอุปกรณ์และท่อโดยการพาความร้อน
- 5.9.2.2 ความร้อนจากผิวด้านในของท่อหรืออุปกรณ์เคลื่อนที่มายังผิวด้านนอกของท่อโดยการนำความร้อน
- 5.9.2.3 ความร้อนที่ผิวด้านนอกของท่อหรืออุปกรณ์เคลื่อนที่ผ่านวัสดุฉนวนกันความร้อน โดยการนำความร้อนมายังผิวด้านนอกของวัสดุฉนวน
- 5.9.2.4 ที่ผิวด้านนอกสุดของวัสดุฉนวนจะมีวัสดุหุ้มทับอีกชั้นหนึ่ง ความร้อนผ่านไปยังผิวนอกด้วยการนำความร้อนเช่นกัน
- 5.9.2.5 ความร้อนจากวัสดุหุ้มทับสูญเสียไปสู่อากาศภายนอกด้วยการแผ่รังสี

ซึ่งทุกขั้นตอนของการถ่ายเทความร้อนย่อมมีการสูญเสียความร้อน โดยธรรมชาติของมันอยู่แล้ว

5.10 ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้นวน

ตารางที่ 5.4 ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้นวน

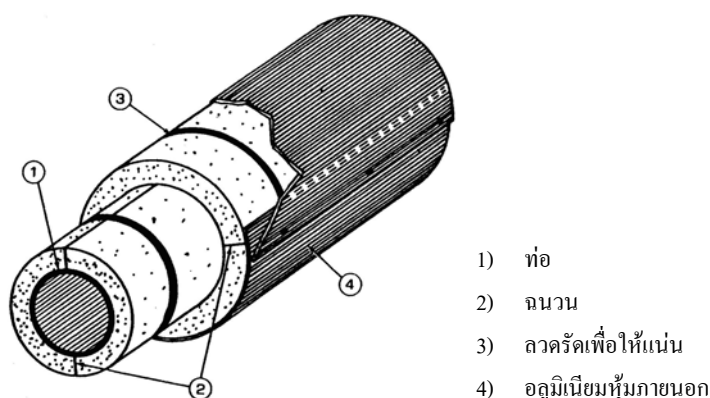
สิ่งที่ต้องคำนึง	แคลเซียมซิลิเกต	ใยหิน	ใยแก้ว
ความร้อน ค่าการนำความร้อน อุณหภูมิใช้งาน ความต้านทานแรงอัด	0.056-0.067 W/mK 650 °C สูงมากเกินแตกเป็นผง	0.045-0.055 W/mK 650 °C ต่ำ กั้นตัวง่าย	0.041-0.043 W/mK 350 °C ต่ำ กั้นตัวดี
ความปลอดภัย ทนไฟ ทนต่อการกัดกร่อนเหล็ก ทนต่อการกัดกร่อนสแตนเลส	ไม่ติดไฟ pH 8-12.5 มี Cl ₂ ไม่เกิน 120 ppm	ไม่ติดไฟ pH 7-9 มี Cl ₂ ไม่เกินที่กำหนด	ไม่ติดไฟ pH 7.5-9 ไม่มี
การติดตั้ง สุขภาพ เสียหายจากการขนย้าย การเตรียมการติดตั้ง การติดตั้ง	เป็นฝุ่นถ้าไม่มีแอสเบส ดอสไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย 10-20% ยุ่งยาก สูงและเสียเวลา	เป็นฝุ่นจะคันเมื่อถูกผิวหนัง แตกย่อยง่าย ง่ายแต่ยุ่งง่าย ปานกลาง	ถูกผิวหนังจะคัน ง่ายไม่ยุบ ต่ำและไม่เสียเวลา

5.11 การหุ้มฉนวนท่อ

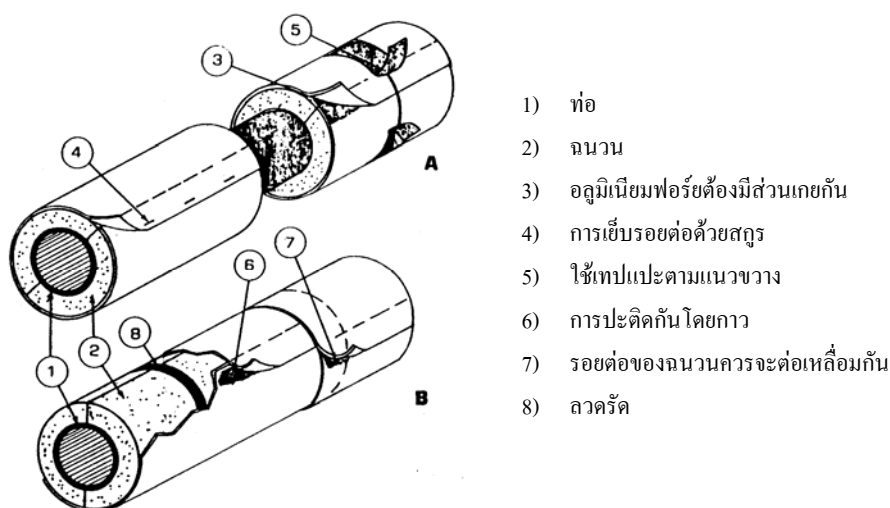
ในการหุ้มฉนวนท่อในงานระบบหม้อไอน้ำนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงด้วยคือวิธีการหุ้มซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อหรือรูปแบบการติดตั้งของท่อที่จะนำมาหุ้มฉนวน การติดตั้งฉนวนกันความร้อนกับท่อและอุปกรณ์ความร้อนต่างๆ แสดงในรูปด้านล่าง

5.11.1 การหุ้มฉนวนท่อในรูปแบบหรือลักษณะต่างๆ

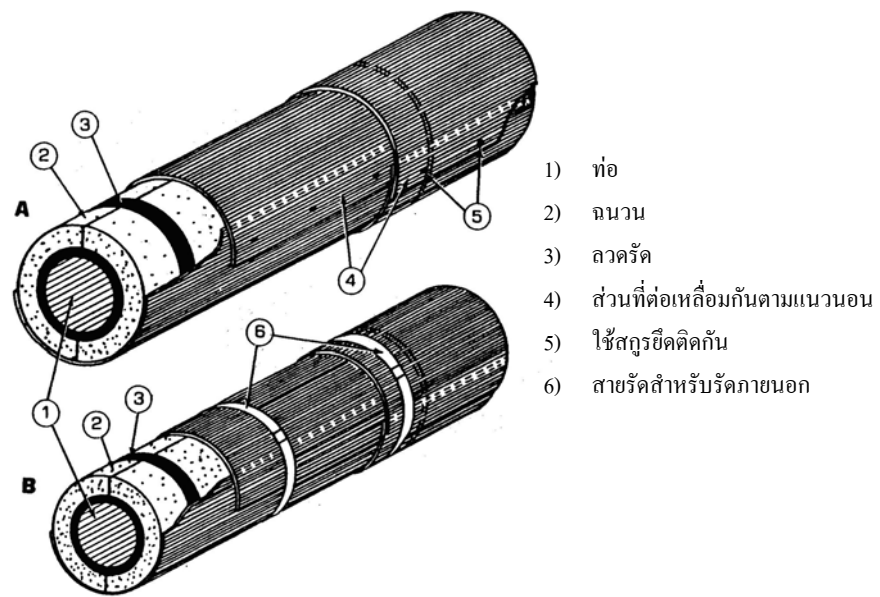
การหุ้มฉนวนในลักษณะแบบต่างๆนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 – 5.18 ซึ่งรูปแบบต่างๆนี้มีส่วนประกอบสำหรับการหุ้มฉนวนท่อและอุปกรณ์หม้อไอน้ำที่ต้องการหุ้มฉนวน เป็นต้น โดยส่วนประกอบนั้นมีหมายเลขระบุเพื่อช่วยสำหรับการพิจารณาให้เข้าใจอย่างชัดเจน



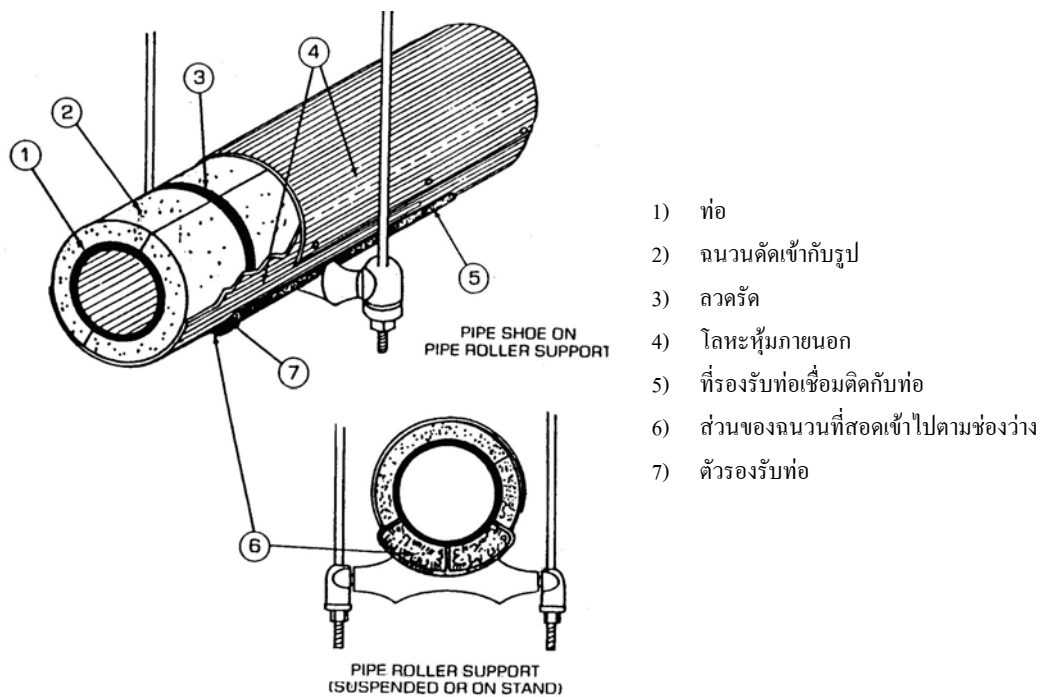
รูปที่ 5.8 Pre-Form Pipe Covering Multiple Layer Construction



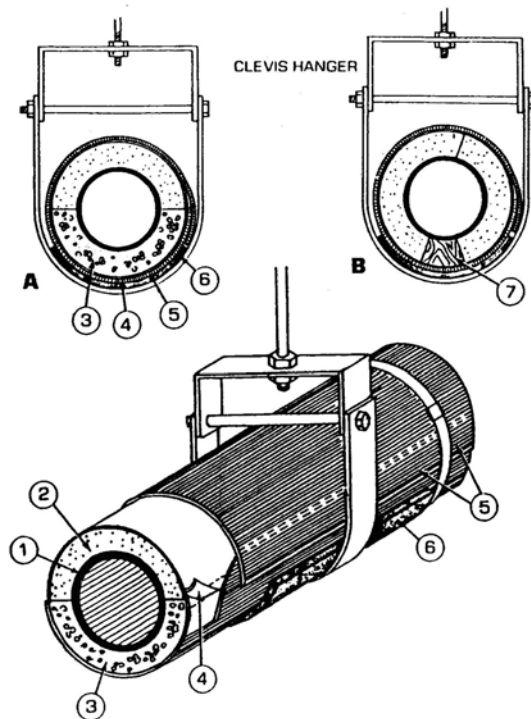
รูปที่ 5.9 Field and Factory-Applied Non-Metal Jacketing



รูปที่ 5.10 Field-Applied Metal Jacketing

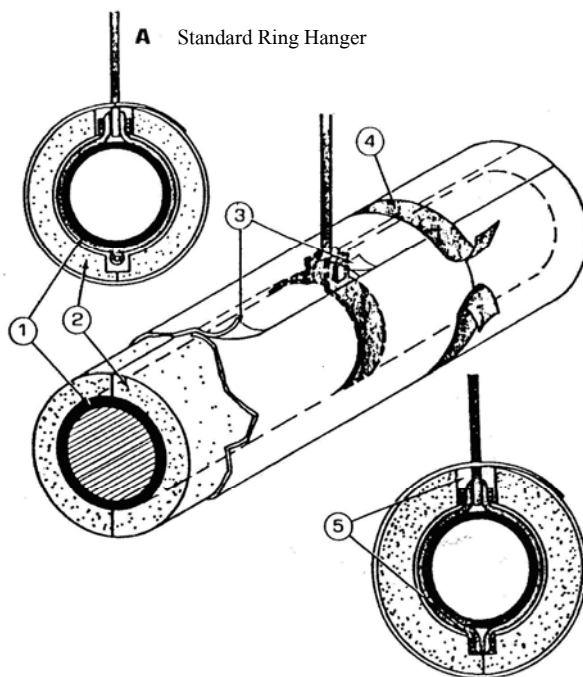


รูปที่ 5.11 Pipe Shoe on Roller Support



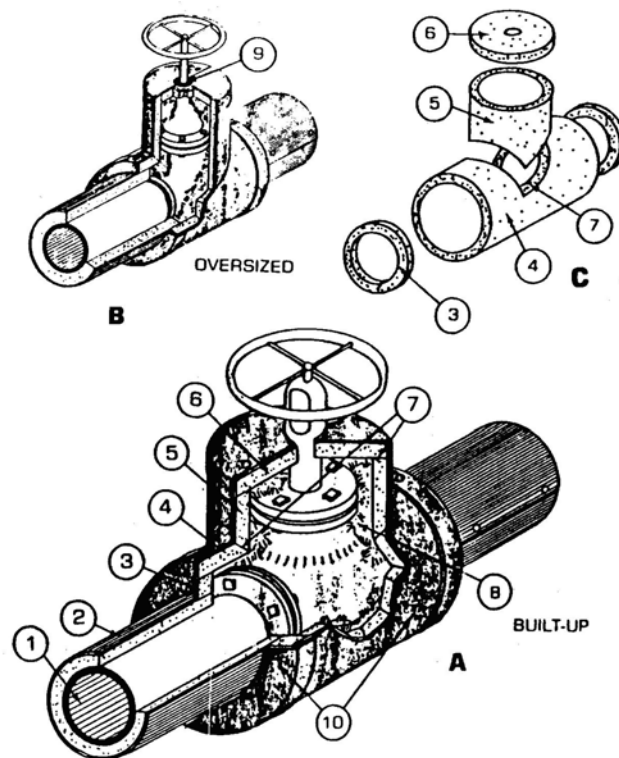
- 1) ท่อ
- 2) ฉนวน
- 3) ฉนวนที่มีความหนาแน่นมากๆ เพื่อรักษาความหนาแน่นไม่ให้เสียหาย
- 4) อลูมิเนียมฟอยล์จากโรงงาน
- 5) โฉนวนหุ้มภายนอก
- 6) โลหะรองรับ
- 7) ไม้หรือลิ้นรองรับ

รูปที่ 5.12 Clevis Hanger High Density Inserts



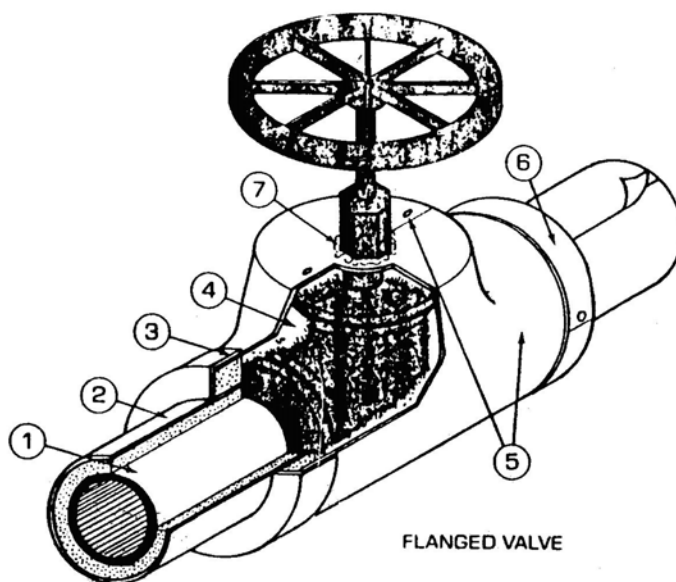
- 1) ท่อ
- 2) ฉนวน
- 3) ส่วนที่เชื่อมกันตามยาวของท่อ
- 4) เทปใช้สำหรับปิดรอยต่อ
- 5) ส่วนที่ต้องเสริมฉนวน

รูปที่ 5.13 Standard and Split Ring Hangers



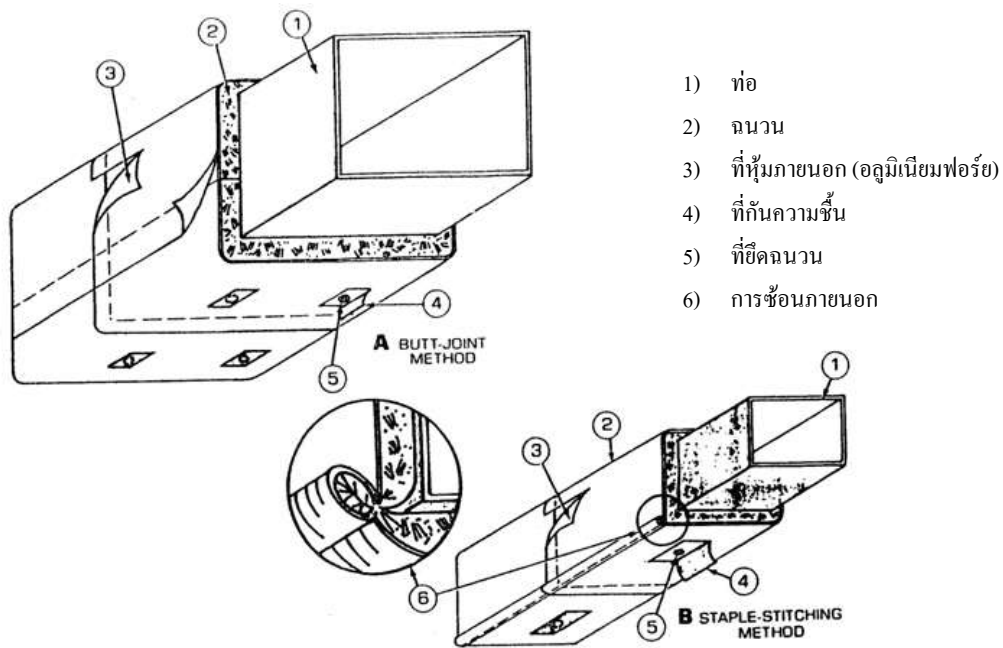
- 1) ท่อ
- 2) ฉนวนเป็นรูปท่อ
- 3) ฉนวนที่ตัดเข้ารูป
- 4) ฉนวนที่ตัดเข้ารูป
- 5) ฉนวนที่ตัดเข้ารูป
- 6) ฉนวนที่ตัดเข้ารูป
- 7) เทปสำหรับรอยต่อ
- 8) ฉนวนที่ใช้อุดตามช่องว่าง
- 9) ปะเก็น
- 10) ก่อสร้างโลหะ

รูปที่ 5.14 Field or Factory – Fabricated Valve/Tee Insulation System

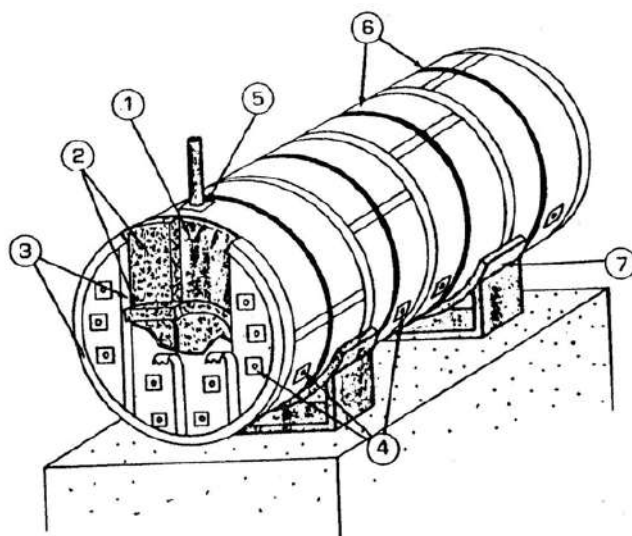


- 1) ท่อ
- 2) ฉนวน
- 3) เปลือกหุ้มภายนอก
- 4) เศษฉนวนใช้อุดตามช่องว่าง
- 5) ที่หุ้มภายนอกชนิด PVC
- 6) ฝาครอบปลายใช้สกรูติด
- 7) ตามเข้ารูป

รูปที่ 5.15 PVC/Glass Fiber Valve/Tee Insulation System



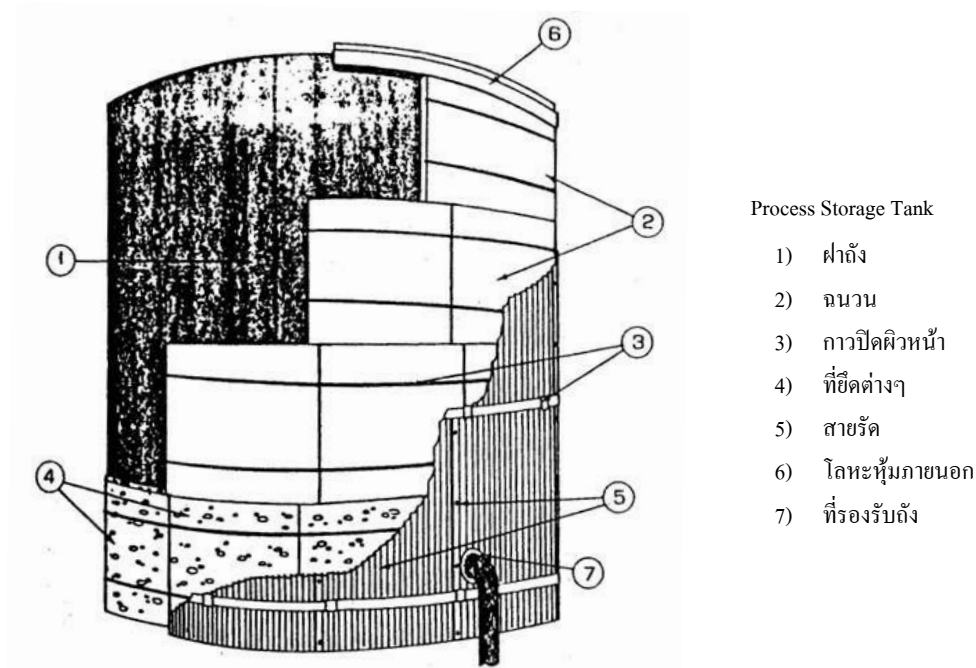
รูปที่ 5.16 Flexible Fibrous Blanket Duct Insulation Rectangular/Indoor



Process Storage Tank

- 1) ฝาถัง
- 2) ฉนวน
- 3) สายรัดถัง
- 4) ฉนวนที่กันถึงแบบ High Density เพื่อรับน้ำหนักได้ดี
- 5) โลหะหุ้มภายนอก
- 6) ฝาปิดปากถัง
- 7) ที่ยึดและอุปกรณ์ต่างๆ

รูปที่ 5.17 Curved Surfaces Rigid Board Insulation



รูปที่ 5.18 Rigid Wrap – Around Insulation

5.11.2 การหุ้มฉนวนที่ไม่เหมาะสม

การหุ้มฉนวนที่ไม่เหมาะสมหรือขาดการตรวจสอบดูแลบำรุงรักษาซึ่งก่อให้เกิดการชำรุดหรือเสียหาย ส่งผลให้เกิดความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานหม้อไอน้ำลดลง สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการหุ้มฉนวนที่ไม่เหมาะสมหรือฉนวนที่เกิดจากการชำรุดทรุดโทรมแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 (ก), (ข), (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) การหุ้มไม่เหมาะสมอาจเป็นเพราะฉนวนสูญเสียความหนาเนื่องจากใช้เส้นลวดรัดจนเกิดการคอดตัวหรือขาดได้ ดังนั้นบริเวณที่เป็นรอยต่อหรือที่เป็นส่วนโค้งควรมีการหุ้มฉนวนอย่างระมัดระวังโดยการใช้เทปกาวที่ใช้สำหรับฉนวนพันเพื่อให้ฉนวนยังคงความหนาตลอดทั้งผิวได้

5.11.3 การหุ้มฉนวนที่เหมาะสม

การหุ้มฉนวนที่ดีนั้นส่งผลให้เกิดการใช้งานที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดเชื้อเพลิง และช่วยลดการสูญเสียได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจและเห็นภาพมากขึ้นสำหรับตัวอย่างการหุ้มฉนวนที่เหมาะสมซึ่งได้มาจากโรงงานแห่งหนึ่งที่ใช้งานจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.20 (ก), (ข), (ค) และ (ง)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.19 แสดงตัวอย่างการหุ้มฉนวนที่ไม่เหมาะสม ดังรูป (ก), (ข), (ค), (ง), (จ) และ (ฉ)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.20 แสดงตัวอย่างการหุ้มฉนวนที่เหมาะสม ดังรูป (ก), (ข), (ค) และ (ง)

5.12 ปัญหาของการใช้ฉนวน

ปัญหาที่พบบ่อยๆของการใช้ฉนวนมีดังนี้การเลือกประเภทฉนวน จำเป็นที่ต้องเลือกชนิดของฉนวนให้สัมพันธ์กับการใช้งาน

- 5.12.1 ใช้ความหนาของฉนวนที่ไม่ถูกต้องกับอุณหภูมิใช้งาน
- 5.12.2 เทคนิคในการติดตั้งฉนวนแต่ละชนิดต้องรู้และเข้าใจอย่างแท้จริง
- 5.12.3 การออกแบบชั้นแรกจำเป็นต้องคำนึงถึง ประเภทของฉนวนที่จะใช้ เพื่อเตรียมการติดตั้งให้ถูกต้อง

5.13 ตัวอย่างการเลือกฉนวนและคำนวณการสูญเสียความร้อนก่อนและหลังหุ้มฉนวน

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าไม่มีฉนวนใดที่มีความสามารถป้องกันการสูญเสียได้สมบูรณ์ 100% ดังนั้นการหาความหนาฉนวนที่เหมาะสมนั้นต้องถูกกำหนดจากต้นทุนการผลิตความร้อนและต้นทุนในการใช้ฉนวน ถ้าใช้ความหนาฉนวนต่ำกว่าค่าหนึ่งหรือค่าที่เหมาะสมแล้วการสูญเสียความร้อนจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นนั่นหมายถึงใช้ความหนาของฉนวนไม่พอ แต่ถ้าใช้ความหนาฉนวนหนากว่าค่าที่เหมาะสมแล้ว ต้นทุนจะสูงขึ้นและอาจไม่คุ้มกับค่าพลังงานที่ประหยัดไปได้ ดังนั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นการสิ้นเปลือง การหาความหนาที่เหมาะสมจะพิจารณาจากข้อมูลต่อไปนี้

1. ค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิง (ราคาเชื้อเพลิงรวมกับค่าจ้าง ค่าบำรุงรักษา ฯลฯ)
2. เวลาที่ใช้งานต่อปี
3. ค่าความร้อนเชื้อเพลิง
4. ประสิทธิภาพการเผาไหม้
5. อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก
6. อุณหภูมิของท่อ
7. ขนาดของท่อ
8. ราคาของฉนวน
9. อายุการใช้งาน
10. ความร้อนที่สูญเสียต่อความยาวหนึ่งเมตร (หรือต่อตารางเมตร ถ้าเป็นพื้นที่ราบ)

5.13.1 ขั้นตอนการหาปริมาณการสูญเสียความร้อนก่อนและหลังหุ้มฉนวนความร้อน

การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวท่อและผนังก่อนและหลังหุ้มฉนวนความร้อน แสดงดังภาคผนวก ก ตารางท้ายหน่วยที่ ก.3 – ก.10 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางท้ายหน่วย ก.3 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวน

ตารางท้ายหน่วย ก.4 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังที่ไม่ได้หุ้มฉนวน

ตารางท้ายหน่วย ก.5 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว

ตารางท้ายหน่วย ก.6 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนเคลือบซีเมนต์

ตารางท้ายหน่วย ก.7 การสูญเสียความร้อนของท่อหลังหุ้มฉนวนใยหิน

ตารางท้ายหน่วย ก.8 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว ตามความหนาฉนวนที่เหมาะสม

ตารางท้ายหน่วย ก.9 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังหลังหุ้มฉนวนใยหิน ตามความหนาฉนวนที่เหมาะสม

ตารางท้ายหน่วย ก.10 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังหลังหุ้มฉนวนเคลือบซีเมนต์ ตามความหนาฉนวนที่เหมาะสม

5.13.2 ขั้นตอนการหาปริมาณการสูญเสียความร้อนดำเนินการดังนี้

1. การหาค่าการสูญเสียความร้อนของท่อก่อนหุ้มฉนวนความร้อน

1.1 วัดอุณหภูมิผิวท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวนเช่น วัดได้ 120°C

1.2 วัดความยาวท่อและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทั้งหมดที่ไม่ได้หุ้มฉนวน เช่น ท่อขนาด 2 in. ยาว 10 m.

1.3 นับจำนวนวาล์วและหน้าแปลนที่ไม่ได้หุ้มฉนวนทั้งหมด โดยหน้าแปลนคิดเป็นความยาวเทียบเท่า 0.4 m. ต่อ 1 ชั้น และวาล์วมีความยาวเทียบเท่า 1.2 m. ต่อ 1 ชั้น เช่น วาล์ว 2 in. 1 ชั้น และหน้าแปลน 2 in. 1 ชั้น เท่ากับความยาว $(1.2 \times 1) + (0.4 \times 1) = 1.6 \text{ m.}$

1.4 เปิดตารางท้ายหน่วยที่ ก.3 การสูญเสียความร้อนของท่อไม่หุ้มฉนวน ที่อุณหภูมิ 120°C ท่อขนาด 2 in. อ่านค่าได้ 0.27 kW/m.

1.5 ชั่วโมงการใช้งานระบบความร้อนของโรงงานเท่ากับ 3000 hr./year

1.6 คิดเป็นค่าการสูญเสียความร้อนรวม

$$= 0.27 \frac{\text{kW}}{\text{m}} \times (10 + 1.6) \text{ m} \times 3,000 \frac{\text{hr.}}{\text{year}} = 9,396.00 \text{ kWhr./year}$$

2. การเลือกฉนวนและหาค่าการสูญเสียความร้อนของท่อหลังหุ้มฉนวนความร้อน

2.1 ทำการเลือกฉนวนที่ใช้โดยตารางที่มีให้นั้นมีฉนวนอยู่ 3 ชนิด (ใยแก้ว ใยหิน และแคลเซียมซิลิเกต) เช่น เลือกฉนวนใยแก้วที่มีความหนาแน่น 64 kg/m³

2.2 อ่านค่าการสูญเสียความร้อนของฉนวนใยแก้วที่อุณหภูมิผิวท่อ 120 °C ของท่อขนาด 2 in. จากตารางท้ายหน่วย ก.5 ซึ่งจะได้ค่าการสูญเสีย 21.00 W/m อุณหภูมิพื้นผิวหลังหุ้มฉนวนเฉลี่ย 44.28 °C

2.3 นำค่าอุณหภูมิผิวท่อก่อนหุ้มฉนวนไปเลือกขนาดความหนาฉนวนที่เหมาะสมจากตารางท้ายหน่วย ก.2 ซึ่งจะได้ความหนาฉนวน 1.5 in. หรือ 38 mm.

2.4 ชั่วโมงการใช้งานระบบความร้อนของโรงงานเท่ากับ 3000 hr./year

2.5 คิดเป็นค่าการสูญเสียความร้อนรวม

$$= 21 \frac{\text{W}}{\text{m}} \times (10 + 1.6) \text{ m} \times 3,000 \frac{\text{hr.}}{\text{year}} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 730.80 \text{ kWhr./year}$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียที่ลดลงจากการหุ้มฉนวนเท่ากับ

$$9,396.00 - 730.80 = 8,665.20 \text{ kWhr./year}$$

หมายเหตุ: การหาค่าการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนัง ใช้วิธีเดียวกันกับการหาความร้อนสูญเสียของท่อ โดยใช้ตารางท้ายหน่วย ก.8 ก.9 และ ก.10 ตามลำดับ

5.14 เอกสารอ้างอิง

- 5.14.1 Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Introduction to Heat Transfer, Third Edition, Wiley, 1996.
- 5.14.2 สุนันท์ ศรีษะนิคย์, การถ่ายเทความร้อน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พิมพ์ครั้งที่ 5, 2538
- 5.14.3 ฉนวนความร้อน, เอกสารเผยแพร่ของกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2547
- 5.14.4 คู่มือการจัดการพลังงานความร้อนภายในโรงงาน, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2550

ภาคผนวก ก
ตารางท้ายหน่วย

ตารางที่ ก.1 ประเภทและหลักการเลือกวัสดุฉนวน

ชนิดของวัสดุฉนวน	ประเภท	อุณหภูมิใช้งานปลอดภัย(°C)	สภาพการนำความร้อน (W/m.K)	จุดเด่น
แอสเบสตอส (Asbestos)	ทรงกระบอก หมายเลข 1	550	ไม่เกิน 0.046 - 0.048	การติดตั้งสะดวก เหมาะสมกับบริเวณที่มีการสั่นสะเทือน
	แผ่น หมายเลข 2	350	ไม่เกิน 0.041 - 0.046	
	ผ้าห่มทนความร้อน เชือกฉนวน	400	ไม่เกิน 0.047 - 0.056	การติดตั้งสะดวก สามารถถอดได้ เหมาะสมกับวาล์วหัวแปลง
ใยหิน (Rock Wool)	แผ่น ทรงกระบอก แถบ	400 - 600	ไม่เกิน 0.034 - 0.041	เหมาะสมกับอุณหภูมิสูง ใช้เป็นฉนวนของหม้อไอน้ำ ถัง ท่อ และทางไฟ เป็นต้น
ใยแก้ว (Glass Wool)	แผ่น หมายเลข 1 8 K-24 K หมายเลข 2 10 K-96 K หมายเลข 3 96 K ทรงกระบอก หมายเลข 1 แถบ	300 - 350	ไม่เกิน 0.046 - 0.034 ไม่เกิน 0.049 - 0.031 ไม่เกิน 0.034 ไม่เกิน 0.032 ไม่เกิน 0.039	เป็นวัสดุฉนวนที่นิยมใช้กันมากที่สุด สภาพการนำความร้อนต่ำ ความสามารถในการรักษาอุณหภูมิได้ดี
แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)	แผ่น หมายเลข 1 1,000 °C ทรงกระบอก หมายเลข 2 650 °C	650	ไม่เกิน 0.050 ไม่เกิน 0.046	มีความแข็งแรงมากถ้าทำเป็นแบบสำเร็จรูป การติดตั้งง่ายและมีความทนทานได้ดี

ตารางที่ ก.2 ความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์สำหรับหุ้มท่อ

ระบบท่อ	ช่วงอุณหภูมิของไหล		ขนาดท่อ					
	°C	°F	<1" (33 mm)	1 1/2" - 2" (42-60mm)	2 1/2" - 4" (73-114mm)	5" - 6" (140-168mm)	8" - 12" (219-324mm)	14" - 20" (350-500mm)
			ความหนาฉนวน					
ไอน้ำ, ไอร้อนยิ่งยวด	239-320	451-608	2.0"(50 mm)	2.0"(50 mm)	2.5"(63 mm)	3"(63 mm)	3.5"(88 mm)	3.5"(88 mm)
ไอน้ำ, น้ำร้อน	152-238	306-450	1.5"(38 mm)	1.5"(38 mm)	2.0"(50 mm)	2.5"(63 mm)	3.0"(75 mm)	3.5"(88 mm)
ความดันสูง	122-151	251-305	1.5"(38 mm)	1.5"(38 mm)	2.0"(50 mm)	2.0"(50 mm)	2.5"(63 mm)	3.0"(75 mm)
ความดันปานกลาง	94-121	201-250	1.0"(25 mm)	1.5"(38 mm)	1.5"(38 mm)	2.0"(50 mm)	2.0"(50 mm)	2.5"(63 mm)
ความดันต่ำ	51-93	149-200	1.0"(25 mm)	1.0"(25 mm)	1.5"(38 mm)	1.5"(38 mm)	1.5"(38 mm)	2.0"(50 mm)
คอนเดนเสท	30-50	110-148	1.0"(25 mm)	1.0"(25 mm)	1.0"(25 mm)	1.5"(38 mm)	1.5"(38 mm)	2.0"(50 mm)

ตารางที่ ก.3 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (kW/m)

ขนาดท่อ	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ		อุณหภูมิผิวท่อหรือผนังร้อน °C													
	De (mm)	Di (mm)	70	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
1/8"	10.29	6.83	0.03	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.24	0.27	0.31	0.35
1/4"	13.72	9.25	0.03	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22	0.26	0.30	0.35	0.40	0.45
3/8"	17.75	12.52	0.04	0.04	0.07	0.09	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.50	0.56
1/2"	21.34	15.80	0.05	0.05	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23	0.28	0.33	0.39	0.45	0.51	0.59	0.66
3/4"	26.67	20.93	0.06	0.06	0.09	0.13	0.18	0.23	0.28	0.34	0.40	0.47	0.55	0.63	0.72	0.81
1"	33.40	26.64	0.07	0.07	0.12	0.16	0.22	0.28	0.34	0.41	0.49	0.57	0.67	0.77	0.88	0.99
1.1/4"	42.16	35.05	0.09	0.09	0.14	0.20	0.27	0.34	0.42	0.51	0.60	0.71	0.82	0.95	1.08	1.23
1.1/2"	48.26	40.89	0.10	0.10	0.16	0.23	0.30	0.38	0.47	0.57	0.68	0.80	0.93	1.07	1.22	1.39
2"	60.33	52.50	0.12	0.12	0.19	0.27	0.36	0.46	0.57	0.70	0.83	0.97	1.13	1.31	1.50	1.70
2 1/2"	73.03	62.71	0.14	0.14	0.23	0.32	0.43	0.55	0.68	0.83	0.98	1.16	1.35	1.55	1.78	2.02
3"	88.90	77.93	0.17	0.17	0.27	0.39	0.51	0.65	0.81	0.98	1.17	1.38	1.61	1.86	2.13	2.42
3 1/2"	101.60	90.12	0.19	0.19	0.31	0.43	0.58	0.74	0.91	1.11	1.32	1.56	1.82	2.10	2.41	2.74
4"	114.30	102.26	0.21	0.21	0.34	0.48	0.64	0.82	1.02	1.23	1.47	1.74	2.02	2.34	2.68	3.06
5"	141.30	128.19	0.26	0.26	0.41	0.58	0.78	0.99	1.23	1.50	1.79	2.11	2.46	2.84	3.26	3.72
6"	168.27	154.05	0.30	0.30	0.48	0.68	0.91	1.16	1.44	1.75	2.09	2.47	2.88	3.34	3.83	4.37
8"	219.08	202.72	0.38	0.38	0.61	0.86	1.15	1.47	1.83	2.23	2.66	3.15	3.68	4.26	4.89	5.58
10"	273.05	254.51	0.47	0.47	0.74	1.05	1.41	1.80	2.24	2.72	3.26	3.85	4.50	5.22	6.00	6.85
12"	323.85	304.80	0.55	0.55	0.87	1.23	1.64	2.10	2.61	3.18	3.81	4.51	5.27	6.11	7.03	8.04

หมายเหตุ: ท่อ Schedule 40 อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.4 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (kW/m)

อุณหภูมิผิวผนัง (°C)	70	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
ความสูงผนัง (m)	การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (kW/m)													
0.50	0.17	0.24	0.37	0.53	0.71	0.92	1.15	1.40	1.68	2.00	2.35	2.74	3.16	3.62
0.60	0.21	0.29	0.46	0.65	0.87	1.11	1.39	1.70	2.04	2.43	2.85	3.31	3.83	4.39
0.70	0.25	0.34	0.54	0.77	1.02	1.31	1.64	2.00	2.41	2.86	3.35	3.90	4.50	5.16
0.80	0.29	0.39	0.62	0.88	1.18	1.52	1.89	2.31	2.78	3.29	3.86	4.49	5.18	5.94
0.90	0.33	0.44	0.71	1.00	1.34	1.72	2.15	2.62	3.15	3.73	4.38	5.09	5.87	6.72
1.00	0.37	0.50	0.79	1.12	1.50	1.93	2.40	2.93	3.52	4.18	4.90	5.69	6.56	7.51
1.10	0.41	0.55	0.88	1.25	1.67	2.14	2.66	3.25	3.90	4.62	5.42	6.29	7.26	8.31
1.20	0.45	0.61	0.96	1.37	1.83	2.35	2.92	3.57	4.28	5.07	5.94	6.90	7.96	9.11
1.30	0.49	0.66	1.05	1.49	2.00	2.56	3.19	3.89	4.67	5.53	6.47	7.52	8.66	9.91
1.40	0.53	0.72	1.14	1.62	2.16	2.77	3.45	4.21	5.05	5.98	7.01	8.13	9.37	10.72
1.50	0.57	0.77	1.23	1.75	2.33	2.99	3.72	4.54	5.44	6.44	7.54	8.75	10.08	11.54
1.60	0.61	0.83	1.32	1.87	2.50	3.20	3.99	4.86	5.83	6.90	8.08	9.38	10.80	12.35
1.70	0.65	0.89	1.41	2.00	2.67	3.42	4.26	5.19	6.22	7.37	8.62	10.00	11.52	13.17
1.80	0.70	0.94	1.50	2.13	2.84	3.64	4.53	5.52	6.62	7.83	9.17	10.63	12.24	14.00
1.90	0.74	1.00	1.59	2.26	3.01	3.86	4.80	5.85	7.02	8.30	9.71	11.26	12.97	14.83
2.00	0.78	1.06	1.68	2.39	3.19	4.08	5.08	6.19	7.41	8.77	10.26	11.90	13.69	15.66
2.10	0.82	1.12	1.77	2.52	3.36	4.30	5.35	6.52	7.81	9.24	10.81	12.54	14.43	16.49
2.20	0.87	1.18	1.86	2.65	3.53	4.53	5.63	6.86	8.22	9.72	11.37	13.18	15.16	17.33
2.30	0.91	1.23	1.96	2.78	3.71	4.75	5.91	7.20	8.62	10.19	11.92	13.82	15.90	18.17

* หมายเหตุ: อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.5 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว (kW/m)

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ		อุณหภูมิ ก่อนหุ้ม(°C)	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
De	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มฉนวน (°C)	40.19	41.34	42.43	42.51	44.28	43.55	44.23	45.36	46.45	47.51	45.69	46.49	47.26	48.02	48.77
mm.	mm.	Pipe size(in.)	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)														
10.29	6.83	1/8"	4.27	5.60	6.96	8.35	11.16	12.20	14.63	17.07	19.52	21.98	22.17	24.39	26.60	28.82	31.04
13.72	9.25	1/4"	4.83	6.35	7.91	8.46	11.25	13.73	16.48	19.25	22.02	24.80	24.81	27.29	29.77	32.26	34.74
17.75	12.52	3/8"	5.44	7.17	8.94	9.51	12.67	15.41	18.51	21.62	24.74	27.87	27.66	30.43	33.21	35.98	38.76
21.34	15.8	1/2"	5.97	7.87	9.83	10.40	13.86	16.82	20.22	23.63	27.05	30.48	30.08	33.07	36.09	39.12	42.14
26.67	20.93	3/4"	6.72	8.88	11.09	11.67	15.56	18.84	22.65	26.49	30.33	34.19	33.45	36.81	40.18	43.55	46.92
33.4	26.64	1"	7.64	10.10	12.64	13.20	17.63	21.28	25.61	29.96	34.32	38.70	37.54	41.32	45.11	48.90	52.69
42.16	35.05	1.1/4"	8.80	11.65	14.60	15.11	20.21	24.35	29.32	34.32	39.34	44.38	42.65	46.96	51.27	55.59	59.90
48.26	40.89	1.1/2"	9.59	12.72	15.94	16.35	21.88	26.44	31.85	37.29	42.76	48.25	46.11	50.78	55.45	60.12	64.79
60.33	52.5	2"	11.13	14.78	18.55	18.81	24.00	30.50	36.76	43.06	49.40	55.76	52.81	58.16	63.52	68.88	74.25
73.03	62.71	2 1/2"	10.54	13.84	17.22	17.81	23.68	29.61	35.59	41.59	47.61	53.65	52.00	57.23	62.46	67.70	72.94
88.90	77.93	3"	12.06	15.86	19.74	20.25	26.95	33.76	40.59	47.45	54.34	61.24	58.95	64.89	70.83	76.78	82.73
101.60	90.12	3 1/2"	13.26	17.45	21.73	22.17	29.52	37.04	44.54	52.08	59.65	67.25	64.43	70.93	77.43	83.93	90.44
114.30	102.3	4"	14.46	19.04	23.72	24.06	32.05	40.29	48.46	56.68	64.93	73.20	69.86	76.90	83.96	91.02	98.09
141.30	128.2	5"	16.98	22.38	27.90	24.18	32.09	47.14	48.57	56.71	64.88	73.07	72.20	79.45	86.70	93.96	101.22
168.27	154.1	6"	19.49	25.70	32.06	27.41	36.39	53.92	55.27	64.55	73.86	83.19	81.84	90.07	98.30	106.54	114.79
219.08	202.7	8"	24.18	31.91	39.84	33.37	44.35	56.42	59.79	69.76	79.76	89.78	88.87	97.77	106.68	115.59	124.51
273.05	254.5	10"	29.15	38.49	48.07	39.57	52.63	67.38	71.06	82.94	94.84	106.77	105.20	115.74	126.30	136.86	147.42
323.85	304.80	12"	33.81	44.66	55.81	45.32	60.30	77.64	81.62	95.27	108.96	122.68	120.46	132.54	144.64	156.74	168.85

หมายเหตุ: ท่อ Sch. 40 ฉนวนใยแก้วความหนาแน่น 64 kg/m³ ค่าการนำความร้อน = 0.042 W/m K อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.6 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวท่อหลังหุ้มฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (kW/m)

เส้นผ่านศูนย์กลาง ท่อ		อุณหภูมิ ก่อนหุ้ม(°C)	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
De	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย(°C)	40.86	42.17	43.42	43.54	45.57	44.79	45.59	46.88	48.14	49.36	47.32	48.24	49.14	50.02	50.88
mm.	mm.	Pipe size(in.)	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m)														
10.29	6.83	1/8"	4.83	6.35	7.92	9.51	12.76	14.08	16.91	19.75	22.60	25.46	25.75	28.33	30.91	33.49	36.08
13.72	9.25	1/4"	5.45	7.19	8.97	9.54	12.71	15.84	19.03	22.25	25.47	28.71	28.80	31.69	34.58	37.48	40.38
17.75	12.52	3/8"	6.13	8.10	10.13	10.70	14.27	17.75	21.35	24.97	28.61	32.25	32.09	35.32	38.56	41.79	45.03
21.34	15.8	1/2"	6.71	8.88	11.11	11.68	15.60	19.37	23.31	27.28	31.26	35.25	34.87	38.38	41.90	45.42	48.95
26.67	20.93	3/4"	7.54	9.99	12.52	13.07	17.48	21.67	26.10	30.56	35.03	39.52	38.79	42.71	46.63	50.56	54.49
33.4	26.64	1"	8.55	11.35	14.24	14.74	19.75	24.46	29.48	34.53	39.61	44.71	43.51	47.92	52.33	56.75	61.17
42.16	35.05	1 1/4"	9.82	13.07	16.42	16.84	22.59	27.97	33.73	39.54	45.37	51.23	49.41	54.43	59.45	64.48	69.52
48.26	40.89	1 1/2"	10.69	14.24	17.91	18.62	24.79	30.35	36.62	42.94	49.29	55.67	53.41	58.84	64.28	69.73	75.18
60.33	52.5	2"	12.39	16.52	20.81	21.80	28.71	34.97	42.23	49.55	56.91	64.30	61.14	67.37	73.61	79.86	86.12
73.03	62.71	2 1/2"	11.91	15.69	19.57	20.02	26.69	34.10	41.04	48.01	55.02	62.05	60.30	66.39	72.49	78.59	84.70
88.90	77.93	3"	13.61	17.95	22.41	22.73	30.32	38.85	46.78	54.75	62.76	70.80	68.34	75.25	82.18	89.11	96.04
101.60	90.12	3 1/2"	14.96	19.74	24.66	24.85	33.18	42.60	51.31	60.08	68.88	77.72	74.67	82.24	89.82	97.40	104.99
114.30	102.3	4"	16.29	21.52	26.89	26.95	35.99	46.32	55.81	65.36	74.96	84.58	80.95	89.16	97.38	105.61	113.85
141.30	128.2	5"	19.11	25.28	31.60	27.25	36.25	54.17	56.08	65.55	75.06	84.59	83.75	92.19	100.65	109.11	117.58
168.27	154.1	6"	21.91	29.00	36.28	30.85	41.06	61.93	63.80	74.59	85.42	96.29	94.91	104.50	114.09	123.70	133.31
219.08	202.7	8"	27.16	35.97	45.04	37.49	49.93	65.00	69.11	80.72	92.36	104.03	103.15	113.52	123.90	134.29	144.68
273.05	254.5	10"	32.70	43.35	54.31	44.39	59.16	77.59	82.12	95.93	109.79	123.69	122.06	134.35	146.65	158.96	171.28
323.85	304.80	12"	37.90	50.27	63.01	50.77	67.70	89.38	94.30	110.18	126.11	142.09	139.75	153.83	167.93	182.03	196.15

หมายเหตุ: ท่อ Schedule 40 ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต ความหนาแน่น 135 kg/m³ ค่าการนำความร้อน = 0.049 W/m K

อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.7 การสูญเสียความร้อนของท่อหลังหุ้มฉนวนใยหิน (kW/m)

เส้นผ่านศูนย์กลาง ท่อ		อุณหภูมิ ก่อนหุ้ม(°C)	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
De	Di	อุณหภูมิหลัง หุ้มเฉลี่ย(°C)	40.38	41.58	42.72	42.81	44.65	43.91	44.62	45.80	46.94	48.04	46.16	46.99	47.80	48.60	49.38
mm.	mm.	Pipe size(in.)	การสูญเสียความร้อนหลังหุ้มฉนวนที่ความหนาที่เหมาะสม (W/m.)														
10.29	6.83	1/8"	4.43	5.82	7.24	8.69	11.62	12.74	15.29	17.84	20.41	22.98	23.20	25.52	27.84	30.16	32.48
13.72	9.25	1/4"	5.01	6.59	8.22	8.78	11.68	14.34	17.22	20.11	23.01	25.92	25.95	28.55	31.15	33.75	36.36
17.75	12.52	3/8"	5.65	7.44	9.29	9.86	13.14	16.08	19.33	22.58	25.85	29.13	28.93	31.83	34.74	37.65	40.56
21.34	15.8	1/2"	6.19	8.17	10.20	10.78	14.37	17.56	21.11	24.68	28.26	31.85	31.44	34.60	37.76	40.92	44.09
26.67	20.93	3/4"	6.96	9.20	11.51	12.08	16.13	19.66	23.65	27.66	31.69	35.73	34.98	38.50	42.03	45.56	49.09
33.4	26.64	1"	7.90	10.47	13.11	13.65	18.25	22.20	26.72	31.28	35.85	40.43	39.25	43.21	47.18	51.15	55.12
42.16	35.05	1.1/4"	9.10	12.07	15.13	15.62	20.91	25.40	30.60	35.83	41.08	46.35	44.59	49.10	53.62	58.14	62.66
48.26	40.89	1.1/2"	9.91	13.16	16.52	14.37	19.09	27.57	33.23	38.92	44.64	50.38	48.21	53.09	57.98	62.88	67.77
60.33	52.5	2"	11.50	15.30	19.22	16.39	21.79	31.79	38.34	44.94	51.56	58.22	55.20	60.81	66.42	72.03	77.66
73.03	62.71	2 1/2"	10.94	14.38	17.90	18.46	24.56	30.91	37.16	43.44	49.74	56.06	54.38	59.86	65.34	70.82	76.31
88.90	77.93	3"	12.51	16.47	20.52	20.98	27.94	35.23	42.37	49.55	56.76	63.99	61.64	67.86	74.08	80.31	86.54
101.60	90.12	3 1/2"	13.76	18.12	22.59	22.96	30.59	38.64	46.49	54.38	62.31	70.26	67.37	74.17	80.98	87.80	94.61
114.30	102.3	4"	15.00	19.76	24.64	24.91	33.21	42.03	50.58	59.18	67.82	76.48	73.04	80.42	87.81	95.21	102.61
141.30	128.2	5"	17.61	23.23	28.98	25.08	33.30	49.17	50.73	59.25	67.81	76.38	75.51	83.10	90.70	98.30	105.91
168.27	154.1	6"	20.20	26.66	33.29	28.42	37.76	56.24	57.73	67.44	77.19	86.96	85.59	94.21	102.83	111.46	120.09
219.08	202.7	8"	25.06	33.10	41.36	34.58	45.98	58.90	62.47	72.91	83.38	93.87	92.97	102.29	111.62	120.95	130.29
273.05	254.5	10"	30.19	39.91	49.90	40.99	54.54	70.32	74.25	86.67	99.14	111.63	110.04	121.08	132.13	143.19	154.26
323.85	304.80	12"	35.01	46.31	57.92	46.92	62.47	81.03	85.27	99.56	113.89	128.26	125.99	138.65	151.32	163.99	176.67

หมายเหตุ: ท่อ Schedule 40 ฉนวนใยหิน ความหนาแน่น 40-200 kg/m³ ค่าการนำความร้อน = 0.044 W/m K อุณหภูมิ

บรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.8 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว ตามความหนาแน่นที่เหมาะสม (kW/m)

ความหนาแน่นที่เหมาะสม										อุณหภูมิพื้นผิว ก่อนหุ้ม(°C)	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
49-93 °C	94 -121 °C		122-151 °C		152-238 °C		239-320 °C		อุณหภูมิพื้นผิว หลังหุ้ม(°C)	40.98	40.48	44.76	43.09	45.74	48.42	51.12	53.83	56.55	59.27	55.76	57.84	59.93	62.02	64.11	
in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	ความสูงผนัง(m)	การสูญเสียความร้อนของผนังหลังหุ้มฉนวนใยแก้ว (W/m)														
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	0.50	23.93	31.40	39.03	32.36	42.97	53.68	64.47	75.31	86.18	97.09	83.02	91.36	99.71	108.06	116.42
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	0.60	28.72	37.69	46.84	38.83	51.56	64.42	77.36	90.37	103.42	116.51	99.63	109.63	119.65	129.68	139.71
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	0.70	33.50	43.97	54.65	45.31	60.15	75.15	90.25	105.43	120.66	135.93	116.23	127.91	139.59	151.29	162.99
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	0.80	38.29	50.25	62.45	51.78	68.75	85.89	103.15	120.49	137.89	155.34	132.83	146.18	159.53	172.90	186.28
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	0.90	43.07	56.53	70.26	58.25	77.34	96.62	116.04	135.55	155.13	174.76	149.44	164.45	179.48	194.51	209.56
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.00	47.86	62.81	78.07	64.72	85.93	107.36	128.93	150.61	172.37	194.18	166.04	182.72	199.42	216.13	232.85
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.10	52.65	69.09	85.87	71.20	94.53	118.10	141.83	165.67	189.60	213.60	182.65	200.99	219.36	237.74	256.13
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.20	57.43	75.37	93.68	77.67	103.12	128.83	154.72	180.74	206.84	233.02	199.25	219.27	239.30	259.35	279.42
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.30	62.22	81.65	101.49	84.14	111.71	139.57	167.61	195.80	224.08	252.43	215.85	237.54	259.24	280.97	302.70
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.40	67.00	87.93	109.29	90.61	120.31	150.30	180.51	210.86	241.31	271.85	232.46	255.81	279.19	302.58	325.99
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.50	71.79	94.21	117.10	97.09	128.90	161.04	193.40	225.92	258.55	291.27	249.06	274.08	299.13	324.19	349.27
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.60	76.58	100.50	124.91	103.56	137.49	171.78	206.29	240.98	275.79	310.69	265.67	292.36	319.07	345.80	372.56
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.70	81.36	106.78	132.71	110.03	146.09	182.51	219.19	256.04	293.03	330.11	282.27	310.63	339.01	367.42	395.84
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.80	86.15	113.06	140.52	116.50	154.68	193.25	232.08	271.10	310.26	349.52	298.88	328.90	358.95	389.03	419.13
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	1.90	90.93	119.34	148.33	122.98	163.27	203.98	244.97	286.16	327.50	368.94	315.48	347.17	378.90	410.64	442.41
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	2.00	95.72	125.62	156.13	129.45	171.86	214.72	257.87	301.23	344.74	388.36	332.08	365.44	398.84	432.26	465.70
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	2.10	100.51	131.90	163.94	135.92	180.46	225.46	270.76	316.29	361.97	407.78	348.69	383.72	418.78	453.87	488.98
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	2.20	105.29	138.18	171.75	142.39	189.05	236.19	283.66	331.35	379.21	427.20	365.29	401.99	438.72	475.48	512.26
1'	25	1.5'	38	1.5'	38	1.5'	38	2'	50	2.30	110.08	144.46	179.55	148.87	197.64	246.93	296.55	346.41	396.45	446.61	381.90	420.26	458.66	497.09	535.55

หมายเหตุ: ฉนวนใยแก้วความหนาแน่น 64 kg/m³ ค่าการนำความร้อน = 0.042 W/m K อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.9 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังหลังหุ้มฉนวนใยหิน ตามความหนาฉนวนที่เหมาะสม (kW/m)

ความหนาฉนวนที่เหมาะสม										อุณหภูมิพื้นผิว ก่อนหุ้ม (°C)	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
49-93 °C		94-121 °C		122-151 °C		152-238 °C		239-320 °C		อุณหภูมิพื้นผิว หลังหุ้ม (°C)	41.21	40.76	45.15	43.44	46.21	49.01	51.83	54.67	57.51	60.37	56.71	58.89	61.08	63.26	65.45
in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	ความสูงผนัง (m)	การสูญเสียความร้อนของผนังหลังหุ้มฉนวนใยหิน (W/m)														
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.50	24.85	32.64	40.59	33.74	44.83	56.04	67.32	78.67	90.05	101.47	86.83	95.56	104.30	113.05	121.81
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.60	29.82	39.16	48.71	40.49	53.80	67.24	80.79	94.40	108.06	121.76	104.19	114.67	125.16	135.66	146.17
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.70	34.79	45.69	56.83	47.24	62.76	78.45	94.25	110.13	126.07	142.06	121.56	133.78	146.02	158.27	170.53
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.80	39.76	52.22	64.95	53.99	71.73	89.66	107.72	125.87	144.08	162.35	138.92	152.90	166.89	180.89	194.89
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.90	44.73	58.75	73.07	60.74	80.69	100.86	121.18	141.60	162.09	182.65	156.29	172.01	187.75	203.50	219.26
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.00	49.70	65.27	81.18	67.49	89.66	112.07	134.65	157.33	180.11	202.94	173.65	191.12	208.61	226.11	243.62
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.10	54.67	71.80	89.30	74.24	98.63	123.28	148.11	173.07	198.12	223.23	191.02	210.23	229.47	248.72	267.98
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.20	59.64	78.33	97.42	80.99	107.59	134.49	161.58	188.80	216.13	243.53	208.38	229.35	250.33	271.33	292.34
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.30	64.61	84.86	105.54	87.73	116.56	145.69	175.04	204.53	234.14	263.82	225.75	248.46	271.19	293.94	316.70
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.40	69.58	91.38	113.66	94.48	125.52	156.90	188.50	220.27	252.15	284.12	243.11	267.57	292.05	316.55	341.07
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.50	74.55	97.91	121.78	101.23	134.49	168.11	201.97	236.00	270.16	304.41	260.48	286.68	312.91	339.16	365.43
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.60	79.52	104.44	129.89	107.98	143.46	179.32	215.43	251.73	288.17	324.70	277.85	305.79	333.77	361.77	389.79
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.70	84.49	110.97	138.01	114.73	152.42	190.52	228.90	267.47	306.18	345.00	295.21	324.91	354.63	384.38	414.15
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.80	89.46	117.49	146.13	121.48	161.39	201.73	242.36	283.20	324.19	365.29	312.58	344.02	375.49	406.99	438.51
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.90	94.43	124.02	154.25	128.23	170.35	212.94	255.83	298.93	342.20	385.59	329.94	363.13	396.35	429.60	462.87
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.00	99.40	130.55	162.37	134.98	179.32	224.14	269.29	314.67	360.21	405.88	347.31	382.24	417.21	452.21	487.24
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.10	104.37	137.08	170.49	141.72	188.29	235.35	282.76	330.40	378.22	426.17	364.67	401.35	438.07	474.82	511.60
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.20	109.34	143.60	178.61	148.47	197.25	246.56	296.22	346.13	396.23	446.47	382.04	420.47	458.93	497.43	535.96
1.5"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.30	114.31	150.13	186.72	155.22	206.22	257.77	309.89	361.87	414.24	466.76	399.40	439.58	479.80	520.04	560.32

หมายเหตุ: ฉนวนใยหิน ความหนาแน่น 40-200 kg/m³ ค่าการนำความร้อน = 0.044 W/m K อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

ตารางที่ ก.10 การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวผนังหลังหุ้มฉนวนแคลเซียมซิลิเกต ตามความหนาแน่นที่เหมาะสม (kW/m)

ความหนาแน่นที่เหมาะสม										อุณหภูมิพื้นผิว ก่อนหุ้ม (°C)	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
49-93 °C		94-121 °C		122-151 °C		152-238 °C		239-320 °C		อุณหภูมิพื้นผิว หลังหุ้ม (°C)	41.77	41.44	46.10	44.29	47.36	50.46	53.60	56.75	59.91	63.08	59.07	61.50	63.93	66.37	68.80
in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.	ความสูงผนัง (m)	การสูญเสียความร้อนของผนังหุ้มฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (W/m)														
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.50	27.08	35.63	44.39	37.14	49.42	61.85	74.38	86.98	99.64	112.33	96.28	106.00	115.73	125.47	135.21
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.60	32.49	42.76	53.27	44.57	59.31	74.23	89.26	104.38	119.56	134.80	115.54	127.20	138.88	150.56	162.25
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.70	37.91	49.89	62.15	52.00	69.19	86.60	104.14	121.78	139.49	157.26	134.80	148.40	162.02	175.65	189.30
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.80	43.33	57.01	71.03	59.43	79.08	98.97	119.01	139.18	159.42	179.73	154.05	169.60	185.17	200.75	216.34
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	0.90	48.74	64.14	79.90	66.86	88.96	111.34	133.89	156.57	179.35	202.19	173.31	190.80	208.31	225.84	243.38
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.00	54.16	71.27	88.78	74.28	98.85	123.71	148.77	173.97	199.27	224.66	192.57	212.00	231.46	250.93	270.42
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.10	59.57	78.40	97.66	81.71	108.73	136.08	163.64	191.37	219.20	247.12	211.82	233.20	254.60	276.03	297.46
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.20	64.99	85.52	106.54	89.14	118.62	148.45	178.52	208.76	239.13	269.59	231.08	254.40	277.75	301.12	324.51
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.30	70.41	92.65	115.42	96.57	128.50	160.82	193.40	226.16	259.06	292.06	250.34	275.60	300.90	326.21	351.55
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.40	75.82	99.78	124.30	104.00	138.39	173.19	208.28	243.56	278.98	314.52	269.60	296.80	324.04	351.31	378.59
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.50	81.24	106.90	133.17	111.43	148.27	185.56	223.15	260.95	298.91	336.99	288.85	318.00	347.19	376.40	405.63
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.60	86.65	114.03	142.05	118.86	158.16	197.93	238.03	278.35	318.84	359.45	308.11	339.20	370.33	401.49	432.67
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.70	92.07	121.16	150.93	126.28	168.04	210.30	252.91	295.75	338.77	381.92	327.37	360.40	393.48	426.59	459.72
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.80	97.48	128.28	159.81	133.71	177.93	222.68	267.78	313.14	358.69	404.39	346.62	381.60	416.63	451.68	486.76
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	1.90	102.90	135.41	168.69	141.14	187.81	235.05	282.66	330.54	378.62	426.85	365.88	402.80	439.77	476.77	513.80
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.00	108.32	142.54	177.56	148.57	197.70	247.42	297.54	347.94	398.55	449.32	385.14	424.01	462.92	501.87	540.84
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.10	113.73	149.66	186.44	156.00	207.58	259.79	312.41	365.34	418.48	471.78	404.39	445.21	486.06	526.96	567.89
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.20	119.15	156.79	195.32	163.43	217.47	272.16	327.29	382.73	438.40	494.25	423.65	466.41	509.21	552.05	594.93
1"	25	1.5"	38	1.5"	38	1.5"	38	2"	50	2.30	124.56	163.92	204.20	170.85	227.35	284.53	342.17	400.13	458.33	516.71	442.91	487.61	532.36	577.15	621.97

หมายเหตุ: ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต ความหนาแน่น 135 kg/m³ ค่าการนำความร้อน = 0.049 W/m K อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 35 °C

หน่วยที่ 6 คุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ

ในการพิจารณาระบบน้ำป้อนของหม้อไอน้ำถือว่ามีความสำคัญซึ่งโดยหลักการหากสามารถลดความกระด้าง ปรับปรุงสภาพความเป็นกลางและลดสารเจือปนที่สามารถละลายในน้ำก่อนป้อนนั้นจะทำให้ห้องเครื่องประกอบทางเคมีดังกล่าว ลดผลกระทบลงอันเกิดผลดีเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อไป

6.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสภาพของน้ำป้อนและการรักษาคุณภาพของน้ำในหม้อไอน้ำ เพื่อประโยชน์ในการรักษาสภาพสมดุลของน้ำในหม้อไอน้ำ

6.2 ขอบเขตและนิยาม

6.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะน้ำป้อน น้ำในหม้อไอน้ำ และน้ำที่ต้องระบาย (Blow Down) เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ชีวิตอายุการใช้งานได้อย่างยาวนานกว่า มีความคงทนลดการบำรุงรักษาโดยรวม และประหยัดพลังงานในระบบโดยรวม

6.2.2 นิยาม

- 6.2.2.1 พีเอช (pH) หมายถึง ค่าแสดงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำ ค่าคุณสมบัติเป็นกลางคือ 7 ถ้าสูงกว่า 7 เป็นด่างและต่ำกว่า 7 เป็นกรด
- 6.2.2.2 ความกระด้าง(Hardness) หมายถึง ค่าแสดงปริมาณแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนที่ปนอยู่ในน้ำซึ่งได้คำนวณปรับค่าเป็นของแคลเซียมคาร์บอเนตหน่วยที่ใช้แสดงค่าเป็น ppm
- 6.2.2.3 ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Oxygen)หมายถึง ปริมาณออกซิเจนสามารถละลายอยู่ในน้ำได้เล็กน้อยประมาณ 7 ppm ที่ 35 °C เนื่องจากออกซิเจนเป็นต้นเหตุของการกัดกร่อนผิวถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำ
- 6.2.2.4 ตะกรัน (Scale) หมายถึง เป็นสิ่งสกปรกในน้ำที่จับเกาะเป็นชั้นแข็งตามถังหรือภายในท่อน้ำเรียกว่าตะกรันในทางตรงกันข้ามของลักษณะเป็นโคลนตกตะกอนอยู่ตอนล่างของถังเรียกว่าสลัดจ์ (Sludge)
- 6.2.2.5 ความเป็นด่าง (Alkalinity) หมายถึง ค่าที่แสดงปริมาณกรดที่ต้องใช้ในการทำให้ส่วนที่เป็นด่างเช่น กลีโคไบคาร์บอเนต กลีโคฟอสเฟต กลีโคซิลิเกตเป็นต้นที่ละลายอยู่ในน้ำให้มีสภาพความเป็นกลาง ปริมาณกรดที่ใช้ในการปรับค่าเทียบเป็นปริมาณ ppm ของแคลเซียมคาร์บอเนต
- 6.2.2.6 M-Alkalinity หมายถึง ดัชนีบ่งบอกความเป็นกลางคือ Methyl Orange (pH 4.8) โดยที่ $Total\ Alkalinity = M-Alkalinity + P-Alkalinity$
- 6.2.2.7 P-Alkalinity หมายถึง P-Alkalinity ของหม้อไอน้ำมีค่าเทียบเท่าความเข้มข้นของกลีโคคาร์บอเนตที่ได้จากการสลายตัวของกลีโคไบคาร์บอเนตเนื่องจากความร้อนหรือของสารจำพวกด่างที่เดิมเข้าไปเพื่อปรุงแต่งคุณภาพน้ำภายในเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ใช้เป็นดัชนีบอกความเป็นกลางคือ Phenolphthalein (pH 9.0)

- 6.2.2.8 ของแข็ง (Total Dissolved Solid) น้ำในหม้อไอน้ำมีของแข็งหลายอย่างผสมอยู่ค่าที่เรียกว่าของแข็งทั้งหมด (Total Solid) หมายถึงปริมาณของมวลสารที่คงเหลือจากการนำน้ำมาระเหยจนหมดถ้าน้ำที่กรองแล้วมาระเหยจนหมดปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่เรียกว่าของแข็งที่ละลายอยู่ (Dissolved Solid) เมื่อหักค่าของแข็งที่ละลายอยู่ออกจากค่าของแข็งทั้งหมดจะได้ของแข็งที่แขวนลอยอยู่ (Suspended Solid)
- 6.2.2.9 คลอไรด์ไอออน (Chloride Ion) ถ้าน้ำในหม้อไอน้ำมีคลอไรด์ไอออนอยู่จะเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนโลหะได้
- 6.2.2.10 ซิลิกา (Silica) น้ำในหม้อไอน้ำมีซิลิกาปนอยู่ได้ 2 ประเภทคือซิลิกาที่ละลายอยู่ในรูปไอออนและที่แขวนลอยอยู่เช่นเกลือซิลิเกตเป็นต้นซิลิกาเหล่านี้จะกลายเป็นตะกอนที่แข็งมาก

6.2.3 น้ำในหม้อไอน้ำ

การที่หม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำที่ความดันสูงและอุณหภูมิสูงในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ก็เนื่องมาจากการ พัฒนาของเทคนิคการปรุงแต่งคุณภาพน้ำป้อนนั่นเอง ถ้าน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมจะเกิดปัญหาการกัดกร่อนผิวถ่ายเทความร้อนหรือปัญหาการจับเกาะของตะกอนแข็งซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้หม้อไอน้ำระเบิดได้นอกจากนี้ ถ้าน้ำในหม้อไอน้ำมีน้ำมันหรือไขมันปนอยู่จะทำให้เกิดฟองซึ่งฟองและหยดน้ำจะปนไปกับไอน้ำและก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่ไม่ต้องการขึ้นได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพน้ำในหม้อไอน้ำให้มีสภาพที่เหมาะสมอยู่ตลอดเวลาสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาที่ละลายอยู่ในน้ำจะต้องทำให้ปราศจากโดยวิธีทางกลหรือทางเคมี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบคุณภาพน้ำและจัดสิ่งสกปรกออกโดยวิธีปรุงแต่งคุณภาพน้ำที่เหมาะสม ปัญหาที่เกิดจากน้ำสามารถจำแนกได้ดังนี้

6.2.4 ปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของน้ำ

น้ำมีคุณภาพไม่เหมาะสมสามารถกัดกร่อนโลหะนานาชนิดที่เป็นอุปกรณ์ของระบบไอน้ำและท่อน้ำทำให้เกิดความเสียหายหรือทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังกล่าวลดต่ำลงและในบางครั้งอาจทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย สาเหตุของการกัดกร่อนโลหะเนื่องจากเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติโดยเป็นขบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนสู่สภาวะเดิมของมันเช่น เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นแร่เหล็กเป็นต้นการกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดทุกขณะเท่าที่โอกาสอันวัยลักษณะของการกัดกร่อนโลหะอาจสรุปได้ดังนี้

- 6.2.4.1 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก เกิดขึ้นเมื่อโลหะ 2 ชนิดสัมผัสกันวางแช่ในน้ำลักษณะเช่นนี้โลหะที่มีตระกูลต่ำกว่าจะเป็นขั้วบวกส่วนโลหะที่มีตระกูลสูงกว่าจะเป็นขั้วลบทำให้มีเซลล์ไฟฟ้าครบวงจรโลหะที่เป็นขั้วบวกจะแตกตัวเป็นไอออนทำให้เกิดการผุกร่อน รายละเอียดตามตารางที่ 6.3
- 6.2.4.2 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดกับอุปกรณ์ที่สัมผัสกับน้ำสาเหตุเพราะมีขั้วบวกอย่างแรงเกิดขึ้นเป็นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดเป็นหลุมเล็กหลุมน้อยอยู่กระจัดกระจายทั่วผิวโลหะ
- 6.2.4.3 การกัดกร่อนเนื่องจากแรงดัน (Stress Corrosion) การกัดกร่อนแบบนี้เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะได้รับแรงกดดันจากภายนอก
- 6.2.4.4 การกัดกร่อนเนื่องจากการขัดสี (Impingement Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่ละน้อยของโลหะที่เกิดการขัดสีของของแข็งกับผิวโลหะ

- 6.2.4.5 การกัดกร่อนโดยน้ำควบแน่น (Condensate Grooving) เกิดขึ้นเฉพาะกับท่อขนส่งน้ำควบแน่นของระบบหม้อไอน้ำต้นเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนคือการรับอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ
- 6.2.4.6 การแตกร้าวเนื่องจากไฮดรอกไซด์ (Caustic Embitterment) การแตกร้าวเนื่องจากด่างไฮดรอกไซด์เป็นลักษณะการกัดกร่อนอีกแบบหนึ่งของหม้อไอน้ำโดยเฉพาะอาการแตกร้าวนี้เกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างเนื้อโลหะแต่มักไม่เกิดขึ้นบ่อยทั้งนี้เนื่องจากมันจะเกิดได้ต้องมีปัจจัย 2 ประการ คือ โลหะต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่มีแรงดึงสูงและสัมผัสกับน้ำที่มีไฮดรอกไซด์สูงมาก

ตารางที่ 6.1 สาเหตุและกลไกของการกัดกร่อนโลหะ

สาเหตุการกัดกร่อน	กลไกการกัดกร่อน
1. น้ำมีฟิออเด้าหรือเป็นกรด	การกัดกร่อนที่เกิดจากกาซไฮโดรเจนหนีออกจากน้ำหรือความต่างศักย์ของขั้วบวกและไฮโดรเจนสูงกว่า Hydrogen overvoltage $\text{ขั้วบวก } X^0 \longrightarrow X^{+a} + ae^-$ $\text{ขั้วลบ } 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$
2. เมื่อน้ำมีดีไอ(และฟิออสูงกว่า 7)	เกิดเซลล์ไฟฟ้าแบบกัดกร่อน
3. โลหะต่างชนิดต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า	เกิดเซลล์ไฟฟ้าแบบกัดกร่อน
4. โลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(เนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ)	ทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากันทุกจุดจึงเกิดขั้วบวกและขั้วลบและทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้า
5. ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีดีไอ เช่น โบหะสองชั้นที่ขัดติดกันด้วยหมุดบริเวณผิวสัมผัสจะมีดีไอต่ำกว่าบริเวณอื่น เป็นต้น	โลหะบริเวณที่สัมผัสกับดีไอสูงจะเป็นขั้วลบและบริเวณที่ดีไอต่ำจะเป็นขั้วบวกที่สึกกร่อน
6. ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนเข้มข้นไม่สม่ำเสมอ	โลหะบริเวณที่สัมผัสกับดีไอสูงจะเป็นขั้วลบและบริเวณที่ดีไอต่ำจะเป็นขั้วบวกที่สึกกร่อน
7. ผิวโลหะที่มีรอยร้าวหรือชำรุดเฉพาะแห่ง	รอยร้าวหรือชำรุดมักเป็นจุดที่การป้องกันเข้าไปไม่ถึงหรือมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณส่วนใหญ่จึงมักผุกร่อน
8. โลหะได้รับความกดดัน เช่น ถูกทำให้ขีด เป็นต้น	บริเวณที่ได้รับความกดดันสูงกว่าจะเป็นขั้วบวกที่ผุกร่อน

ตารางที่ 6.2 อนุกรมศักวานิกของโลหะและโลหะผสมในน้ำทะเลที่มีออกซิเจนสมบูรณ์

ขั้วบวกซึ่งถูกกัดกร่อน
↑ Magnesium alloy Zinc Beryllium Aluminum alloy Cadmium Mild steel, Wrought Iron Cast Iron, Flake or Ductile Low-alloy high- strength steel Nickel-resist,type 1&2 Naval bronze (CA 464),yellow bronze (CA268),Aluminum bronze(CA687) Red bronze (CA230),Admiralty bronze (CA443),Manganese bronze Tin Copper (CA102,110),Silicon bronze (CA655) Lead-Tin solder Tin bronze (G&M) Stainless steel,12-14 % chromium (AISI Type 410,416) Nickel silver (CA732,735,745,752,764,770,794) 90/10 Copper-nickel (CA706) 80/20 Copper-nickel (CA710) Stainless steel,16-18 % chromium (AISI Type 430) Lead 70/30 Copper-nickel (CA715) Nickel-aluminum bronze Inconel alloy 600 Silver braze alloys Nickel 200 Silver Stainless steel,18 chromium,8 nickel (AISI Type302,304,321,347) Monel alloys 400,K-500 Stainless steel,18 chromium,12 nickel-molybdenum (AISI Type 316,317) Carpenter 20 stainless steel, Incoloy alloy 825 Titanium, Hastelloy alloys C&C276,Inconel alloy 625 ↓ Graphite, graphitized cast iron
ขั้วลบที่ไม่ถูกกัดกร่อน

6.2.5 ปัญหาเรื่องตะกอนในหม้อไอน้ำ

ปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอและมักหลีกเลี่ยงได้ยากอีกประการหนึ่งที่เกิดกับระบบหม้อไอน้ำได้แก่เรื่องตะกอนที่เกิดจากน้ำ ตะกอนที่เกิดขึ้นจะเป็นฉนวนต่อการถ่ายเทความร้อนซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิดคือตะกอนสนิม หมายถึงตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์และตะกอนหินปูนซึ่งเกิดขึ้นจากการตกผลึกของแร่ธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมตะกอนหินปูนมักเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่สารประกอบดังกล่าวมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุดดังนั้นจึงตกผลึกได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงนอกจากนี้ตะกอนหินปูนยังอาจเป็นสารประกอบอื่นเช่น แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคาร์บอเนตหรือสารประกอบของเหล็ก ซิลิกาและแมงกานีสเป็นต้น

ตารางที่ 6.3 ตะกอนต่างๆที่พบในระบบหม้อไอน้ำและระบบน้ำต่างๆ

ชื่อวิทยาศาสตร์	สูตร	ชื่อสามัญ	ผลกระทบ
แคลเซียมคาร์บอเนต	CaCO_3	ซอล์ค, หินปูน	ตะกอนอ่อน
แคลเซียมไบคาร์บอเนต	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	-	ตะกอนอ่อน
แคลเซียมซัลเฟต	CaSO_4	ยิบซัม, ปูนพลาสเตอร์	ตะกอนแข็ง
แมกนีเซียมคาร์บอเนต	MgCO_3	แมกนีไซด์	ตะกอนอ่อน
แมกนีเซียมซัลเฟต	MgSO_4	Epsom Salt	การกัดกร่อน
ซิลิกอน ไดออกไซด์	SiO_2	ซิลิกา	ตะกอนแข็ง
แคลเซียมคลอไรด์	CaCl_2	-	การกัดกร่อน
แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	-	ตะกอนอ่อน, การกัดกร่อน
แมกนีเซียมคลอไรด์	MgCl_2	-	การกัดกร่อน
โซเดียมคลอไรด์	NaCl	เกลือแกง	Electrolysis
โซเดียมคาร์บอเนต	Na_2CO_3	โซดาแอช, โซดาซักผ้า	ความเป็นด่าง
โซเดียมไบคาร์บอเนต	$\text{Na}(\text{HCO}_3)_2$	โซดาทำขนม	น้ำเป็นฟอง
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	โซดาไฟ	ด่าง, โลหะแตกร้าว
โซเดียมซัลเฟต	Na_2SO_4	Glauber's Salt	ความเป็นกรด

6.2.6 ปัญหาเรื่องน้ำปะทุ (Priming) และน้ำเป็นฟอง (Foaming) ในหม้อไอน้ำ

น้ำปะทุในหม้อไอน้ำหมายถึงลักษณะการเดือดอย่างรุนแรงและผิดปกติของน้ำในหม้อไอน้ำที่ทำให้ระดับน้ำมีความแปรปรวนเป็นอย่างมากเป็นเหตุให้การควบคุมของหม้อไอน้ำเป็นไปได้ยากและยังเป็นเหตุให้น้ำกระเด็นเป็นฝอยและหลุดไปปะปนกับไอน้ำทำให้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไอน้ำลดลง ส่วนน้ำเป็นฟอง หมายถึงการเกิดฟองขนาดเล็กมากมายขึ้นบนผิวน้ำคล้ายกับฟองผงซักฟอกในอ่างซักผ้า

6.2.7 ปัญหาเรื่องแครีโอเวอร์ในหม้อไอน้ำ

แครีโอเวอร์เป็นการทำให้น้ำมีมลทินด้วยสารที่อยู่ในน้ำเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำได้เนื่องจากมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างละอองน้ำเดือดกับไอน้ำ

6.3 หลักการป้องกันการกัดกร่อนโลหะ

โพลาไรเซชัน(Polarization) หมายถึงการลดแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะและทำให้เกิดการสุกร่อนของโลหะน้อยที่สุดทั้งนี้โดยการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วบวกหรือขั้วลบในลักษณะที่ทำให้ความแตกต่างศักย์ของขั้วทั้งสองมีค่าน้อยที่สุดดังนั้นโพลาไรเซชันจึงหมายถึงการป้องกันและควบคุมการกัดกร่อนโลหะนั่นเอง

6.4 หลักการควบคุมการสร้างตะกรัน

ตะกรันเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการตกผลึกของสารประกอบที่ละลายอยู่ในน้ำการหมุนเวียนน้ำในลักษณะที่ทำให้น้ำมีความเข้มข้นสูงเป็นเหตุให้มีการตกผลึกเกิดขึ้นเสมอสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุดจะตกผลึกก่อนตะกรันที่เกิดขึ้นจะเป็นตะกรันแข็งหรือตะกรันเหลวก็ได้ตะกรันของซิลิกาจะเป็นตะกรันแข็งที่จับแน่นบนผิวโลหะ ส่วนตะกรันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์แอมพาไทต์นั้นเป็นตะกรันหรือตะกอนเหลวซึ่งไม่จับแน่นโลหะเป็นต้นหลักการป้องกันและควบคุมตะกรันสรุปได้ดังนี้

6.4.1 โดยการระบายน้ำเข้มข้นทิ้ง เพื่อเป็นการลดปริมาณสารต่างๆในน้ำ

6.4.2 โดยการกำจัดต้นเหตุของตะกรัน ต้นเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของตะกรันคือความกระด้างในน้ำ

6.5 การปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ

การลดความเข้มข้นของน้ำในหม้อไอน้ำด้วยวิธีระบายน้ำบางส่วนทิ้ง และเติมน้ำเลี้ยงวิธีนี้เป็นวิธีการเจือจางน้ำภายในหม้อไอน้ำทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องสร้างตะกรันและความผิดปกติอื่นๆแต่อาจไม่สามารถแก้หรือลดปัญหาเรื่องการกัดกร่อน

ตารางที่ 6.4 ระดับความเข้มข้นของแร่ธาตุที่ยอมให้มีได้ในหม้อไอน้ำ

1. STEAM BOILER							
	1	2	3	4	5	6	7
Boiler type		Combined flue and smoke-tube boiler			Quick steam generator	Combined flue and smoke-tube boiler and quick steam generator	
Operating pressure	bar.g	≤ 1	$> 1 \leq 22$	$> 22 * \leq 44$	≤ 36	≤ 44	>44
Water chemical operation		Saline 1)				Low-salt 2)	Salt-free 3)
2. BOILER FEED WATER							
General requirements		colorless clear free of undissolved matter					
pH value at 25 °C	pH value	> 9	> 9	> 9	8.5 - 9.5	> 9	> 9
Ks8,2 p-value	mmol / l	> 0.1	> 0.1	> 0.1	> 0.1	> 0.1	-
Ks4,3 m - value	mmol / l	see legend					
Earth alkalines (total hardness)		< 0.015	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.005
		< 0.1	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.03
Oxygen (O ₂)	mg / l	< 0.1	< 0.2	0.2	< 0.1	< 0.2	< 0.1
Oxygen binding agents		see legend					
Electr. conductivity at 25 ⁰ c (original)	ms/cm			<. 500		5 - 50	< 5
Carbon dioxide , comnined (CO ₂)	mg / l	< 25	< 25	< 25	< 50	< 10	< 1
Iron , total (Fe)	mg / l	-	< 0.05	< 0.03	-	< 0.03	< 0.03
Copper , total (Cu)	mg / l	-	< 0.01	< 0.05	-	< 0.005	< 0.005
Oil , grease	mg / l	< 3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
KMnO ₄ Consumption as much	mg / l	< 10	< 10	< 10	< 20	< 5	< 3
Sillicic acid (SiO ₂)	mg / l	Only limit values for boiler water apply				< 2	< 0.05

ตารางที่ 6.4 ระดับความเข้มข้นของแร่ธาตุที่ยอมให้มีได้ในหม้อไอน้ำ (ต่อ)

3. BOILER WATER		in the case of quick steam generators : See reverse					
General requirements		colorless , clear , free of undissolved matter					
pH value at 25 ⁰ C	pH value	10.5 - 12	10.5 - 12	10-11.8	10.5-12	10.5-11.5	9.8-10.8
Ks (o-value)	mmol / l	1-8	1-12	0.5-6	1-8	0.5-3	0.1-1
Earth alkalines (total hardness)	mmol / l	< 0.015	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	⁰ dH	< 0.1	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
If using oxygen binding agents							
Hydrazine (N ₂ H ₄) or	mg / l	see legend					
Sodium sulphite (Na ₂ SO ₃)	mg / l	10-30	10-30	10-20	-	10-20	-
Electr. conductivity at 25 ⁰ c (original)	ms/cm	30-5000	30-7500	30-5000	30-5000	30-2000	30-300
Phosphate (PO ₄)	mg / l	10-20	10-20	5-15	5-10	10-30	10-20
KMnO ₄ Consumption as much	mg / l	< 100	< 150	< 100	-	< 50	< 30
Sillicic acid (SiO ₂)	mg / l	-	< 150	< 50	-	< 40	< 4

ALL VALUES ARE BASED ON GERMAN STANDARD

* IN CASE BOILERS WITH SUPERHEATER ALSO LOWER OPERATING PRESSURE POSSIBLE

6.5.1 การควบคุมและป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ

การเกิดตะกรันมักหลีกเลี่ยงได้ยากเพราะน้ำในธรรมชาติมีส่วนประกอบที่เอื้ออำนวยต่อการตกผลึกและการสร้างตะกรันตะกรันส่วนใหญ่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยการตกผลึกไม่นับเป็นปัญหาที่แท้จริงถ้าผลึกดังกล่าวแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่จับผิวโลหะและสร้างเป็นตะกรัน ปัญหาเรื่องตะกรันในหม้อไอน้ำหรือในอื่นๆเกิดขึ้นเพราะแคลเซียมและแมกนีเซียมรวมตัวกับคาร์บอเนตและซัลเฟตทำให้เกิดการตกผลึกเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำและจับตัวกันเคลือบผิวโลหะในหม้อไอน้ำ ในทางอ้อมซิลิกาและสารคอมเพล็กซ์ซิลิเกตก็สามารถสร้างตะกรันได้เช่นกัน ถ้ามีซิลิกาอยู่ในน้ำในระดับที่เกินกว่าความสามารถในการละลายน้ำของมันตะกรันที่เกิดที่เกิดจากซิลิกาและซิลิเกตก่อปัญหาได้มากกว่าตะกรันคาร์บอเนตและซัลเฟตเพราะเป็นตะกรันที่แข็งและจับแน่น

6.5.2 การควบคุมและป้องกันการกัดกร่อนโลหะ

การควบคุมและป้องกันการกัดกร่อนโลหะสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

6.5.2.1 การทำลายสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมซึ่งจำเป็นต่อการสร้างปฏิกิริยาการกัดกร่อนเช่น กำจัดออกซิเจนออกจากน้ำ กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำเป็นต้น

6.5.2.2 การสร้างฟิล์มป้องกันผิวโลหะที่สึกกร่อนโดยการเติมสารห้ามสนิมบางชนิด

6.5.3 การควบคุมและป้องกันน้ำปะทุน้ำเป็นฟองและแครีโอเวอร์

การแก้ปัญหาเรื่องน้ำปะทุน้ำเป็นฟองที่เป็นต้นเหตุอย่างหนึ่งของการแครีโอเวอร์สามารถทำได้ โดยการระบายน้ำหมุนเวียนทิ้งให้เพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมตัวของสารต่างๆเกินกว่าขีดจำกัด

6.6 อุปกรณ์ทำความสะอาดน้ำภายนอกระบบ

น้ำในอุดมคติสำหรับใช้กับระบบหม้อไอน้ำต้องไม่ทำให้เกิดการตกผลึกจนเป็นตะกรันหรือไม่กัดกร่อนวัสดุ นอกจากนี้ต้องไม่ทำให้เกิดน้ำปะทุน้ำเป็นฟองและแครีโอเวอร์ในหม้อไอน้ำในธรรมชาติก็มีมลทินซึ่งประกอบด้วย สารต่างๆที่ก่อปัญหาและเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของระบบหม้อไอน้ำ ด้วยเหตุนี้การทำความสะอาดเพื่อกำจัดสาร แปลกปลอมในน้ำจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆต่อระบบหม้อไอน้ำตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆที่สัมผัส กับน้ำการทำความสะอาดและปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบต่างๆอาจแบ่งได้เป็นสองขั้นคือการทำความสะอาด ภายนอกกระบวนการและการปรุงแต่งภายในระบบการทำความสะอาดภายนอกกระบวนการเป็นการกำจัดหรือลดความเข้มข้นของ แร่ธาตุที่ก่อปัญหาต่างๆให้กับน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำจุดมุ่งหมายของขั้นตอนนี้ก็ต้องการกำจัดแร่ธาตุดังกล่าวให้หมดสิ้นแต่ ในทางปฏิบัติมักทำไม่ได้ทั้งนี้อาจเนื่องจากต้องเสียเงินสูงเกินไปหรือความสามารถของอุปกรณ์มีจำกัดโดยปกติสิ่งที่ ต้องการกำจัดภายนอกกระบวนการได้แก่ออกซิเจนในน้ำความกระด้างและตะกอนแขวนลอยดังนั้นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ทำ ความสะอาดน้ำภายนอกกระบวนการมีดังนี้

6.6.1 ระบบทำน้ำอ่อน (Water Softener)

ความกระด้างในน้ำเป็นต้นเหตุของการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำและอุปกรณ์อย่างอื่นอุปกรณ์ที่ใช้ น้ำ กระด้างเป็นจำนวนมากมีปัญหาในเรื่องตะกรันที่เกิดบนผิวโลหะที่ใช้ถ่ายเทความร้อนบางครั้งตะกรันสามารถ เกิดขึ้นได้ภายในระยะเวลาสั้นและก่อให้เกิดปัญหาต่างๆดังนั้นการกำจัดความกระด้างออกจากน้ำก่อนนำไปใช้ จึงอาจเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้โดยเหตุที่เครื่องทำน้ำอ่อนเป็นอุปกรณ์ที่รู้จักกันแพร่หลายหลักการกำจัดความ กระด้างเพียงเพื่อต้องการต้องการมิให้เกิดปัญหาต่างๆโดยเฉพาะการเกิดตะกรัน อุปกรณ์ทำน้ำอ่อนสำหรับน้ำ เลี้ยงหม้อไอน้ำมักเป็นแบบที่ใช้ Ion Exchange Resin (เรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออน) เรซินที่ใช้แลกเปลี่ยน ไอออนสามารถดูดแคลเซียมและแมกนีเซียมออกจากน้ำที่ไหลผ่านชั้นเรซินและในขณะเดียวกันเรซิน ก็คาย โซเดียมออกจากตัวให้กับน้ำนั่นคือเรซินดังกล่าวกำจัดความกระด้างของน้ำโดยใช้โซเดียมในตัวแลกเปลี่ยนเอา แคลเซียมและแมกนีเซียมออกมาน้ำทำให้โซเดียมเข้าไปอยู่ในน้ำและในขณะเดียวกันแคลเซียมและ แมกนีเซียมจะถูกดูดติดอยู่ในชั้นเรซินโซเดียมเป็นไอออนที่ละลายน้ำได้ดีมากและจะไม่ตกผลึกออกจากน้ำ เหมือนแคลเซียมและแมกนีเซียมดังนั้นโอกาสในการสร้างตะกรันจึงมีน้อยมากการแลกเปลี่ยนลักษณะนี้จะ เกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งไอออนของโซเดียมทั้งหมดถูกปล่อยออกจากเรซินและทำให้เรซินอิ่มตัวไปด้วย แคลเซียมและแมกนีเซียมเมื่อถึงจุดนี้ก็เป็นเวลาที่ต้องทำให้เรซินมีอำนาจขึ้นมาใหม่ (Regeneration) โดยการ ล้างเรซินด้วยสารละลายเกลือแกงในระหว่าง Regeneration สารละลายเกลือแกงที่อิ่มตัวจะถูกกรองผ่านเรซินทำ ให้เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อยู่ใน เรซินกับโซเดียมที่อยู่ในสารละลายผลที่ได้ คือเรซินจะคายแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไปและดูดเอาโซเดียมเข้ามาไว้ในตัวทำให้ เรซินพร้อมที่จะใช้ กำจัดความกระด้างได้ใหม่อีกครั้งหนึ่งรูปที่ 6. 1 เป็นอุปกรณ์ทำน้ำอ่อนแบบแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ทั่วไปกับ หม้อไอน้ำ



รูปที่ 6.1 ระบบผลิตน้ำอ่อน

6.6.2 ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแลกเปลี่ยนไอออน (Demineralization system)

ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแลกเปลี่ยนไอออนประกอบด้วยถังกรองเรซิน 3 ถังคือ CATION FILTER, ANION FILTER และ MIXED BED FILTER มีหลักการทำงานดังนี้

6.6.2.1 CATION FILTER

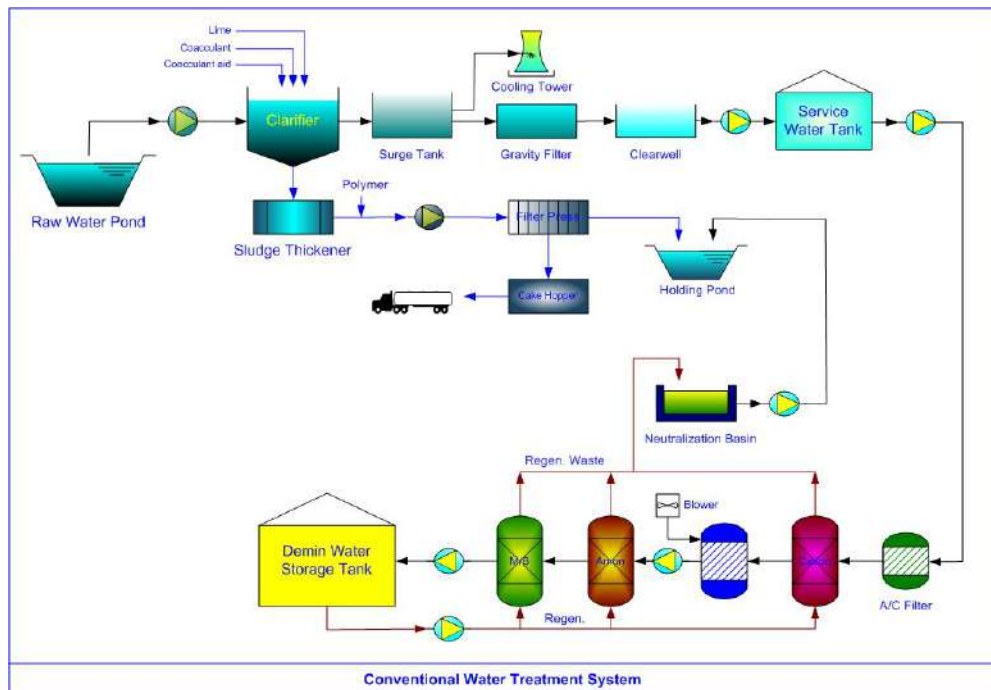
เป็นถังกรองที่ใช้ดูดซับไอออนประจุบวกทุกชนิดที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำภายในบรรจุสารกรองสังเคราะห์ Strong Cation Exchange Resin ซึ่งมีความสามารถพิเศษในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกภายในตัว Resin เองกับไอออนบวกในน้ำ โดยเราจะเติมไอออนที่เราต้องการให้กับ Resin ก่อน เรียกเป็นการฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regeneration) แล้วจึงนำสารกรองนั้นมากรองน้ำ Resin ก็จะจับไอออนบวกในน้ำทุกชนิดไว้และปล่อยไอออนบวกที่เราเติมไว้ออกไปในน้ำ ในระบบ Demineralize นี้ ไอออนบวกที่ต้องการและเติมให้กับ Resin ไว้ก่อนก็คือ H^+ เมื่อนำสารกรองนี้มากรองน้ำจะทำให้ น้ำที่ผ่านออกมามีไอออนบวกที่เหลือเป็น H^+ ทั้งหมด ซึ่งมีสภาพเป็นกรดชนิดต่างๆ เช่น กรดคาร์บอนิก กรดกำมะถัน กรดเกลือ เป็นต้น แต่สำหรับไอออนประจุลบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ H^+ ที่ใช้เติมให้กับเรซิน ในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพก็จะได้จากกรดชนิดต่างๆ แต่ที่ใช้กันมากที่สุด คือ กรดกำมะถัน เนื่องจากสามารถทำให้มีความเข้มข้นสูง (98%) ประหยัดค่าขนส่งและการจัดเก็บ และกรดชนิดนี้ยังไม่กลายเป็นไอกรด กัดกร่อน โครงสร้างอาคารที่เกี่ยวข้อง เมื่อจะใช้งานจะเจือจางให้เหลือความเข้มข้นเพียง 1-5% แล้วผ่านกรดเจือจางนี้เข้าไปในถังกรอง H^+ ในสารละลายกรดก็จะไปแทนที่และไล่ไอออนบวกชนิดอื่นที่จับอยู่กับเรซินออกไป กรดกำมะถันที่ใช้มีสูตรทางเคมีเป็น H_2SO_4 ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็น H^+ และ SO_4 ส่วนของ SO_4 นี้ จะไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับเรซินและถูกปล่อยออกทิ้ง กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดเกลือ (HCl) เป็นกรดอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน

6.6.2.2 ANION FILTER

เป็นถังกรองที่ใช้ดูดซับไอออนประจุลบที่ไม่ต้องการออกจากน้ำ ภายในถังบรรจุสารกรองสังเคราะห์เช่นกัน แต่เป็นชนิด STRONG ANION EXCHANGE RESIN ลักษณะการใช้งานก็จำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูสภาพก่อนใช้งานเช่นเดียวกับ CATION FILTER แต่จะใช้ด่างน้ำ หรือโซดาไฟ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 4% ผ่านเข้ามาในถังกรองเพื่อเติม OH- ให้กับเรซิน ก่อน ฉะนั้นเมื่อนำมาใช้งานกรองน้ำที่ผ่านถังกรองออกมาจะมีไอออนประจุลบเป็น OH- ทั้งหมด และเนื่องจาก ANION FILTER นี้ติดตั้งอยู่หลัง CATION FILTER ซึ่งน้ำผ่าน CATION FILTER จะมีประจุบวกเป็น H+ ทั้งหมดนั้นจะเกิดการรวมตัวกันของ H+ และ OH- กลายเป็น โมเลกุลน้ำ H_2O และปราศจากแร่ธาตุใดๆ ละลายอยู่เลย

6.6.2.3 MIXED BED

เป็นถังกรองถึงสุดท้ายของขบวนการ Demineralization ภายในบรรจุสารกรองทั้ง 2 ชนิด คือ Cation และ Anion Resin คลุกเคล้าผสมผสานกันใช้เพื่อกรองแร่ธาตุที่หลุดรอดจากถังกรอง Cation และ Anion Filter ออกมา โดยเฉพาะเมื่อสารกรองในถังทั้งสองข้างดัน ใกล้จะหมดความสามารถในการดูดซับไอออนที่ไม่ต้องการ ถังนี้จะรับภาระเพียงเล็กน้อยจึงมีอายุการใช้งานต่อการฟื้นฟูสภาพ 1 ครั้ง ยาวนานกว่า Cation พอ Anion Filter มาก แต่ก็มีความจำเป็นในการรักษาความบริสุทธิ์ของน้ำที่ผลิตออกมาการฟื้นฟูสภาพสารเรซินในถังจำเป็นต้องแยกชั้นเรซิน ออกจากกันเสียก่อน การล้างย้อนด้วยน้ำเรซินทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ก็จะแยกตัวกันเอง จากนั้นจึงฟื้นฟูสภาพ Anion Resin (จะอยู่ชั้นบน) ด้วยด่าง และฟื้นฟูสภาพ Cation Resin ด้วยกรด หลังจากนั้นจะใช้น้ำบริสุทธิ์เข้าไปล้างไล่เอากรดและด่าง ส่วนที่เหลือเกิดออกจนหมดสิ้นแล้ว จึงทำการคลุกเคล้าให้เรซิน ทั้ง 2 ผสมผสานกันใหม่ โดยใช้ลมเป่าย้อน เพื่อเตรียมไว้ใช้งานต่อไป



รูปที่ 6.2 ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแลกเปลี่ยนไอออน

6.6.3 ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบ Reverse Osmosis (RO) system

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนบางๆ (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจาง ไปยังสารละลายเข้มข้น เยื่อเมมเบรนออสโมติกยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โมเลกุล หรือไอออนบางชนิด อาจไหลผ่านได้เช่นกัน สมมติมีตู้ น้ำอยู่ และเยื่อเมมเบรนมาทาบตรงกลางด้านซ้ายเป็นสารละลายเข้มข้น ด้านขวาเป็นสารละลายเจือจาง เมื่อปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับน้ำในด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้นจะสูงกว่าระดับน้ำในด้านขวาซึ่งเป็นน้ำเจือจาง ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่า แรงดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) นักวิทยาศาสตร์ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ออสโมซิสว่า อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมี (Vapor Pressure) ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองด้านของเยื่อเมมเบรนจึงมีการปรับตัวจนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากจะทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับ ซึ่งเป็นการต้านการไหลตามธรรมชาติ วิธีดังกล่าวนี้วิศวกรนำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่างๆ และเรียกว่า Reverse Osmosis (RO) หรือออสโมซิสย้อนกลับ ดังนั้นกระบวนการ RO จึงอาศัยปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ แรงดัน และ เยื่อเมมเบรน

กระบวนการเยื่อเมมเบรน (Membrane Processes) หมายถึงกระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi-Permeable Membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำ หรือของเหลว กระบวนการเยื่อเมมเบรนที่สำคัญมี 3 แบบ คือ Electro dialysis (ED), Reverse Osmosis (RO) และ Ultra Filtration (UF) ความแตกต่างของกระบวนการทั้งสามประเภทอยู่ที่ความสามารถในการแยกสารละลายที่มีขนาดต่างๆ และแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการแยก และน้ำออกจากกัน Electro Dialysis (ED) ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบซึ่งแตกตัวเป็นไอออนได้ ออกจากน้ำ แต่ไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ ส่วน Reverse Osmosis (บางครั้งเรียกว่า Hyper Filtration) และ Ultra Filtration (UF) ใช้แรงดันในการแยกสารต่างๆ ออกจากน้ำ Reverse Osmosis (RO) สามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ เกือบทุกชนิดออกมาได้ แต่ UF มีความสามารถน้อยกว่า RO เพราะสามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่เท่านั้น อย่างไรก็ตาม UF มักใช้แรงดันประมาณ 7 บาร์ หรือน้อยกว่า ส่วน RO มักใช้แรงดันตั้งแต่ 20-70 บาร์ หรือสูงกว่า เยื่อเมมเบรนของกระบวนการทั้งสาม มีหน้าที่ และขีดความสามารถไม่เท่ากัน กล่าวคือ แผ่นเยื่อเมมเบรนของ RO สร้างขึ้นเพื่อให้ น้ำไหลผ่านเท่านั้น และไม่ตั้งใจให้สารอื่นๆ ไหลผ่านได้ แผ่นเยื่อเมมเบรนสำหรับ UF นั้นก็ได้เฉพาะสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 500 และยอมให้สารอื่นๆ รวมทั้งน้ำไหลผ่าน แผ่นเยื่อเมมเบรนสำหรับ ED มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวก และแผ่นลบ ซึ่งยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่าน โมเลกุลของน้ำไหลผ่านแผ่นเยื่อเมมเบรนได้ยากความแตกต่างระหว่าง ED, RO, และ UF

ตารางที่ 6.5 แสดงระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบ Reverse Osmosis (RO) system

กระบวนการ	แรงขับเคลื่อน	สารที่แยกออกจากรน้ำได้
RO	แรงดัน 20-70 บาร์หรือสูงกว่า	เกลือแร่, กรด, ด่าง, สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 (รวมทั้งแบคทีเรีย ฯลฯ)
UF	แรงดันประมาณ 7 บาร์ หรือต่ำกว่า	สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500
ED	แรงดันไฟฟ้า	สารที่แตกตัวเป็นไอออนได้

ในปัจจุบัน ความจำเป็นที่ต้องใช้น้ำสะอาดที่มีปริมาณสารละลายต่ำ และความสกปรกที่เพิ่มขึ้นของแหล่งน้ำดิบ ทำให้กระบวนการเมมเบรนต่างๆ มีความสำคัญเพิ่มขึ้น และกลายเป็นระบบที่จำเป็นในหลายกรณี เนื่องจากระบบ RO นั้น มีขีดความสามารถกว้างขวางกว่า UF และ ED ดังนั้น จึงมีการนำ RO ไปใช้ในการทำความสะอาดน้ำดื่มมากกว่าระบบเมมเบรนแบบอื่น



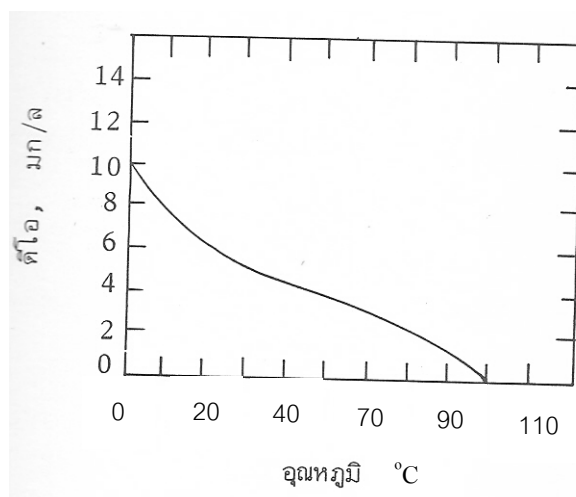
รูปที่ 6.3 ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบ Reverse Osmosis (RO)

6.6.4 ดีแอเรียเตอร์(เครื่องกำจัดกาซละลายน้ำ)

การกำจัดออกซิเจนในน้ำน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องกระทำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงเกิดขึ้นกับท่อส่งน้ำและท่อในหม้อไอน้ำ วิธีกำจัดออกซิเจนจากน้ำมี 2 วิธีคือวิธีเคมีและวิธีกายภาพวิธีแรกเป็นการเติมสารเคมีบางอย่างเช่น โซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำจนเกิดเป็นสารใหม่ที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนส่วนวิธีที่สองนั้นเป็นการกำจัดออกซิเจนโดยใช้หม้ออุ่นน้ำเลี้ยงธรรมดาหรือดีแอเรียเตอร์สำหรับในทางปฏิบัติการใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเพียงลำพังมักไม่ได้ผลอย่างเต็มที่หรือถ้าใช้ได้ก็ไม่ประหยัดจึงนิยมใช้ทั้งสองวิธีไปด้วยกันกล่าวคือใช้ดีแอเรียเตอร์เพื่อกำจัดออกซิเจนส่วนใหญ่

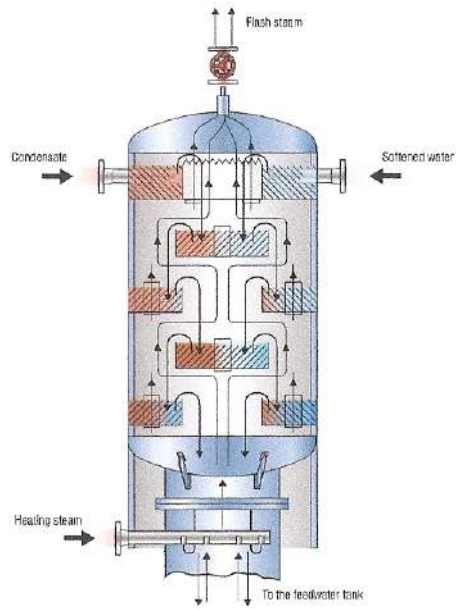
ก่อนจากนั้นจึงเติมสารเคมีเพื่อกำจัดออกซิเจนส่วนที่เหลือขอให้ตระหนักไว้ว่าน้ำในหม้อไอน้ำต้องไม่มีออกซิเจนอย่างเด็ดขาด ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเพียง 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงดีแอเรเตอร์เพียงลำพังไม่สามารถลดออกซิเจนให้เหลือน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ การเติมสารเคมีเพียงอย่างเดียวสามารถลดออกซิเจนได้ 100 % แต่ก็ไม่ใช่หนทางปฏิบัติที่ดีและไม่เป็นการประหยัด

ทราบได้ที่หม้อไอน้ำมีทางเปิดสู่บรรยากาศไม่ว่าจะผ่านทางถังเก็บควบแน่นหรือถังเก็บน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำทราบนั้นจะมีการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศให้กับน้ำทำให้มีปริมาณออกซิเจนสูงละลายในน้ำ น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำช่วยให้มีออกซิเจนเข้าสู่หม้อไอน้ำมากยิ่งขึ้นเพราะน้ำเลี้ยงก็มีออกซิเจนละลายอยู่ด้วยนอกจากนี้ น้ำเลี้ยงซึ่งเป็นน้ำเย็นจะทำให้ น้ำควบแน่นมีอุณหภูมิต่ำลงเมื่อส่งกลับไปยังหม้อไอน้ำเป็นเหตุให้ออกซิเจนจากอากาศสามารถละลายในน้ำได้เพิ่มขึ้นการที่เป็นเช่นนี้เพราะความสามารถในการละลายน้ำของออกซิเจนเป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิรูปที่ 6.3 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะเห็นได้ว่าถ้าอุณหภูมิสูงถึง 82 และ 93 °C (180 และ 200 °F) ปริมาณออกซิเจนสูงสุดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 2 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรและเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 102 °C (215 °F) จะไม่มีออกซิเจนละลายในน้ำได้เลย



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิ

เครื่องดีแอเรเตอร์แบบที่ง่ายที่สุดคือแบบหม้ออุ่นน้ำเลี้ยงธรรมดาตามรูปที่ 6.4 ซึ่งประกอบด้วยชุดไอน้ำแบบวงจรปิดหรือเปิดวางอยู่ในถังน้ำควบแน่นซึ่งมีที่ระบายอากาศชุดไอน้ำถูกควบคุมอย่างอัตโนมัติเพื่อให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 82 - 93 °C (180 - 200 °F) หรือสูงกว่านั้นโดยไม่ทำให้เกิด Cavitation หรือ Steam Shock ขึ้นกับเครื่องสูบน้ำ เครื่องดีแอเรเตอร์แบบหนึ่ง ใช้ไอน้ำฉีดล้างน้ำทดแทนและน้ำควบแน่นเพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ให้ออกจากน้ำภายในเครื่องดีแอเรเตอร์แบบนี้ น้ำถูกปล่อยให้ไหลกระจายผ่านชั้นของตัวกลางเฉื่อยลงข้างล่างไอน้ำจะถูกฉีดจากข้างล่างผ่านชั้นของตัวกลางเฉื่อยขึ้นมาข้างบนน้ำและไอน้ำจะไหลสวนทางกันตัวกลางเฉื่อยจะถูกเลี้ยงเป็นชั้นๆ เพื่อช่วยให้มีการสัมผัสระหว่างน้ำและไอน้ำอย่างทั่วถึง ทำให้ก๊าซที่ละลายน้ำอยู่ถูกถ่ายเทให้กับไอน้ำและถูกไอน้ำพาออกจากเครื่องดีแอเรเตอร์ทางระบายอากาศซึ่งออกแบบเป็นพิเศษโดยยอมให้ก๊าซหนีออกไปได้เท่านั้น ไอน้ำจะไม่สามารถหนีออกไปได้สำหรับหม้อไอน้ำขนาดใหญ่มักใช้ดีแอเรเตอร์ที่ออกแบบโดยเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.5 ดีแอเรเตอร์



รูปที่ 6.6 ดีแอเรเตอร์ติดตั้งบนถ้ำน้ำเลี้ยง

6.7 เอกสารอ้างอิง

- 6.7.1 ผศ.ดร.มันสิน ดัชนีกุลเวศม์,การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524
- 6.7.2 โยชิโอะโกะ ทาคามุระ,เทคนิคการประหยัดพลังงานภาคความร้อนสำหรับหัวหน้างานและวิศวกร,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2525
- 6.7.3 PK NAG ,Power Plant Engineering Second Edition, McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2001

หน่วยที่ 7 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปส่วนใหญ่มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิต โดยใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้ให้เกิดความร้อนและต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ ส่งตามท่อไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ควบคุมหรือดูแลจะต้องทราบถึงรายละเอียดดังกล่าวเพื่อนำไปปฏิบัติจริงได้ในโรงงานอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์ของการควบคุมดูแลระบบการเผาไหม้ที่ดีในโรงงานเพื่อลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการการเผาไหม้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการดำเนินการด้านการประหยัดพลังงานและยังสามารถช่วยลดมลพิษต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นในหน่วยนี้จะเน้นถึงระบบการเผาไหม้ในระบบหม้อไอน้ำโดยเริ่มจาก แนะนำเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ คุณสมบัติของเชื้อเพลิง ทฤษฎีการเผาไหม้ กระบวนการตรวจวัดและดูแลควบคุมการเผาไหม้ ตลอดจนถึงหลักในการจัดเก็บเชื้อเพลิง

7.1 วัตถุประสงค์

เพื่อให้เข้าใจถึงประเภทและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้กับหม้อไอน้ำหลักการของการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ และสามารถจัดเตรียมสถานที่และการเก็บเชื้อเพลิงต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมตามกฎหมายความปลอดภัย

7.2 ขอบเขตและนิยาม

7.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะเชื้อเพลิงที่ใช้กันในระบบหม้อไอน้ำโดยส่วนใหญ่ และทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเผาไหม้ขั้นพื้นฐาน รวมทั้งการตรวจวัดและควบคุมดูแลการเผาไหม้ ตลอดจนวิธีการจัดเก็บเชื้อเพลิง

7.2.2 นิยามและคำศัพท์

- 7.2.2.1 เชื้อเพลิง คือ สารที่เมื่อถูกเผาไหม้แล้วจะให้ความร้อนออกมา
- 7.2.2.2 ค่าความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยทำให้ก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์นั้นเย็นลงจนถึงอุณหภูมิบรรยากาศมีหน่วยเป็น kJ/kg หรือ kJ/m^3
- 7.2.2.3 การเผาไหม้คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศ เพื่อปล่อยพลังงานความร้อนออกมาสำหรับใช้ประโยชน์ และก๊าซไอเสียร้อน
- 7.2.2.4 การเผาไหม้สมบูรณ์คือ การที่ก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยาพอดีกับธาตุในเชื้อเพลิงเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และพลังงาน นั่นคือประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุด
- 7.2.2.5 สตอยคิโอเมตรี (Stoichiometry) คือ เรื่องที่ว่าด้วยการสมดุลของมวลในปฏิกิริยาการสันดาป

- 7.2.2.6 ไอศติสต่อยคิโอเมตริก (Stoichiometric Mixture) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อมวลทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเผาไหม้ทางทฤษฎีหรือตามสโตยคิโอเมตริกของการเผาไหม้
- 7.2.2.7 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีหรือ (A/F)_{stoi} คืออัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยมวลทางทฤษฎีหรือตามสโตยคิโอเมตริกของการเผาไหม้
- 7.2.2.8 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio; ϕ) คือปริมาณไร้หน่วยที่นิยมนใช้ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวบอกให้ทราบว่าส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์นั้นมีความใกล้เคียงหรือห่างไกลจากค่าทางทฤษฎีมากน้อยแค่ไหนอย่างไร
- 7.2.2.9 เปอร์เซนต์อากาศทางทฤษฎี (Percent Theoretical Air) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอัตราส่วนอากาศ (Air ratio) ก็ได้คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซนต์ของปริมาณอากาศทางทฤษฎีหรือตามสโตยคิโอเมตริกการเผาไหม้
- 7.2.2.10 เปอร์เซนต์อากาศส่วนเกิน (Percent Excess Air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่ามียปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซนต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100
- 7.2.2.11 การควบคุมการเผาไหม้คือ การควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาควันดำหรือมีปริมาณอากาศมากเกินไป

7.3 ประเภทและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงเป็นสารที่มีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอน และ ไฮโดรเจน เป็นส่วนใหญ่ เมื่อเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศ จะให้พลังงานความร้อนออกมาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน จึงเรียกว่า เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Fuels) ในเชื้อเพลิงอาจจะมีกำมะถันปนอยู่เล็กน้อยเชื้อเพลิงอาจมีกำมะถันปนอยู่บ้าง เชื้อเพลิงสามารถแบ่งประเภทตามสถานะได้ 3 ประเภท คือ

7.3.1 เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuels)

- 7.3.1.1 เชื้อเพลิงแข็งจากธรรมชาติ (Natural Solid Fuels)
- (ก) ไม้พืน (Wood) $C_{41} H_{63} O_{27} N_{0.8}$ ค่าความร้อนจะเปลี่ยนไปตามชนิดของไม้และความชื้น โดยมีกำมะถันปนอยู่น้อยมาก
 - (ข) ถ่านพีท (Peat) เป็นถ่านผงร่วนๆ จะพบได้ในบริเวณหนองบึง เป็นขั้นตอนแรกของการ เกิดถ่านหิน ซึ่งไม่พบในประเทศไทย
 - (ค) ถ่านลิกไนท์ (Lignite) $C_{61} H_{47} O_{12} N_{0.7} S_{0.6}$ เป็นขั้นถัดมาของการเกิดถ่านหิน มีความชื้นสูงถึง 40% ปริมาณคาร์บอน 60% ขึ้นไปเมื่อแห้งจะแตกเปราะง่ายไม่เหมาะแก่การเก็บไว้นานๆ
 - (ง) ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินชั้นดีขึ้นไป มีความชื้นน้อย 4-6 % มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 75-90% มีความแข็งแรงทนต่อการขนถ่ายและเก็บสำรอง เผาไหม้จะให้เปลวไฟสีเหลือง

- (จ) ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite Coal) เป็นชั้นยอดสุดของถ่านหิน มีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 90% ขึ้นไป มีสารระเหยไวน้อยมาก เผาไหม้เกือบไม่มีควัน มีเปลวไฟน้อยมาก

7.3.1.2 เชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตขึ้นมา (Prepared Solid Fuels)

- (ก) ถ่านไม้ (Wood Charcoal) ได้จากการเผาไม้พื้ในในที่ๆ จำกัดปริมาณอากาศที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 280 °C ค่าความร้อนขึ้นกับชนิดของไม้
- (ข) ถ่านโค้ก (Coke) เป็นถ่านหินพวกบิทูมินัส มีสีดำไม่เป็นเงา พรุณ เผาไหม้ มีสารระเหย เถ้า และกำมะถัน จะไม่มีควัน มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 85-90 %
- (ค) ถ่านอัด (Briquette Coal) ผลิตจากการนำเอาผงฝุ่นของถ่านลิกไนท์ มาอัดด้วยความดันสูงจนเป็นก้อนหรือแท่ง อาจมีสารยึดเหนี่ยวพวกน้ำมัน ดินเหนียว และอื่นๆ ข้อดีคือไม่มีการสูญเสียเชื้อเพลิงผ่านช่องตะแกรงเตาและเป็นการเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงด้วย
- (ง) ถ่านผง (Pulverized Coal) ถ่านลิกไนท์หรือถ่านหินเกรดต่ำๆ ที่มีปริมาณขี้เถ้าสูง มักจะนำมาทำให้แห้งแล้วบดเป็นผง ใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำในโรงงานผลิตซีเมนต์ (Cement Kiln)

7.3.1.3 เชื้อเพลิงแข็งที่เป็นผลพลอยได้จากเศษวัสดุจากการเกษตร ซึ่งสามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ง

- (ก) แกลบ (Paddy Husk) ค่าความร้อนประมาณ 13.4-14.65 MJ/kg (3,200-3,500 kcal/kg) ที่ความชื้น 9-11% ปริมาณขี้เถ้า 18-19% ขี้เถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นซิลิกา ออกไซด์ มีความคมมาก ท่อของหม้อน้ำจะสึกหรือเร็วกว่าปกติ
- (ข) ขี้เลื่อย (Sawdust) ที่ความชื้น 7.5% ค่าความร้อน 14.65 MJ/kg (4,630 kcal/kg) มีปริมาณขี้เถ้า 6.2 %
- (ค) กากอ้อย (Bagasse) มีความชื้น 50% ค่าความร้อนสูงประมาณ 9.42 MJ/kg (2,250 kcal/kg) ค่าความร้อนต่ำประมาณ 7.53 MJ/kg (1,800 kcal/kg)
- (ง) กากปาล์ม กากนุ่น เปลือกกะหล่ำ เป็นผลพลอยได้จากโรงงานน้ำมันพืช มักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำในโรงงาน
- (จ) ได้มีการนำแกลบ ขี้เลื่อย และกากอ้อย มาทำการอัดเป็นแท่งด้วยความดันสูง เป็นถ่านอัดนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและหม้อน้ำได้ดี

7.3.2 เชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuels)

ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude Oil) อาจแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

- 7.3.2.1 ส่วนที่เบาที่สุด เป็นก๊าซในอุณหภูมิและบรรยากาศปกติ ได้แก่ ก๊าซโพรเพน และบิวเทน ซึ่งจะมี สภาพเป็นของเหลวภายใต้แรงอัดประมาณ 689-1379 kPa (100-200 psi) เป็นที่รู้จักกันว่า ก๊าซหุงต้ม (Liquefied Petroleum Gas หรือ LPG)
- 7.3.2.2 ส่วนที่หนักขึ้น สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวในอุณหภูมิและบรรยากาศธรรมดา เรียกว่า สิ่งกลั่น (Distillate)

- (ก) ช่วงจุดเดือดเบา ได้แก่ น้ำมันเบนซิน มีช่วงจุดเดือด 35-180 °C
 - (ข) ช่วงจุดเดือตกลาง ได้แก่ น้ำมันก๊าด มีช่วงจุดเดือด 150-275 °C
 - (ค) ช่วงจุดเดือดหนักขึ้นมามาก ได้แก่ น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว มีช่วงจุดเดือด 225-350 °C
- 7.3.2.3 ส่วนที่หนักที่สุด มีจุดเดือดเกิน 350 °C ซึ่งไม่ระเหยกลายเป็นไอในหอกกลั่น เรียกว่า กากกลั่น (Residual) นำมาผลิตเป็นน้ำมันเตาเกรดต่างๆ โดยใช้ น้ำมันดีเซลหรือน้ำมันก๊าดมาผสมกับกากกลั่น (ซึ่งหนักมาก) น้ำมันเตาเกรดใสจะมีอัตราส่วนของน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันก๊าดมากกว่าน้ำมันเตาเกรดที่หนักกว่า

7.3.3 ก๊าซเชื้อเพลิง (Gas Fuels)

7.3.3.1 ก๊าซเชื้อเพลิงจากธรรมชาติ (Natural Gaseous Fuels)

ก๊าซจากบ่อก๊าซธรรมชาติ (Gas Field Gas) และก๊าซจากบ่อน้ำมันดิบ (Associated Gas) ซึ่งมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบใหญ่ที่สำคัญ จะต้องส่งเข้าโรงแยกก๊าซธรรมชาติเพื่อแยกออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ และนำไปใช้ประโยชน์ให้เหมาะสมตามคุณลักษณะและคุณค่าของก๊าซชนิดต่างๆ

- (ก) ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน และมีจุดเดือดต่ำมากถึง -161 °C จึงต้องขนส่งผ่านท่อ ปัจจุบันส่งให้โรงไฟฟ้าบางปะกง เชื้อเพลิงหม้อไอน้ำ โรงไฟฟ้าพระนครใต้และโรงงานปูนซิเมนต์ไทยท่าหลวง แก่งคอย โรงงานเซรามิก ที่หินกอง สระบุรี
- (ข) ก๊าซธรรมชาติเหลว (LNG : Liquefied Natural Gas) ได้จากการลดอุณหภูมิก๊าซธรรมชาติลง จนมีอุณหภูมิประมาณ -164 °C ก็จะกลายสภาพเป็นของเหลว มีปริมาตรลดลง 600 เท่า เหมาะแก่การส่งจำหน่ายทางเรือ เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ จะต้องทำให้ระเหยเป็นก๊าซก่อน
- (ค) ก๊าซธรรมชาติอัด (CNG : Compressed Natural Gas) ด้วยการนำเอาก๊าซธรรมชาติในข้อ 1 มาอัดด้วยความดันประมาณ xx kPa (3,000 psi) มีความหนาแน่นประมาณ 140 kg/m³ ใช้เป็นเชื้อเพลิงยานพาหนะได้
- (ง) ก๊าซหุงต้ม (LPG : Liquefied Petroleum Gas) คือ ก๊าซโพรเพน (C_3H_8) หรือก๊าซบิวเทน (C_4H_{10}) หรือก๊าซ โพรเพนผสมก๊าซบิวเทน ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ตามสภาพที่ผลิตได้ เช่น ปัจจุบันมี โพรเพน 70% บิวเทน 30% ความหนาแน่นของก๊าซเหลวประมาณ 0.51-0.55 kg/liter
- (จ) เบนซินธรรมชาติ (NGL = Natural Gasoline Liquid) เป็นส่วนที่หนักกว่าก๊าซหุงต้ม ประกอบด้วย เพนเทน (C_5H_{12}) และพวกที่หนักกว่ามีสภาพเป็นของเหลวในอุณหภูมิปกติส่วนใหญ่จะส่งเข้าโรงกลั่นน้ำมันผลิตเป็นน้ำมันเบนซิน หรือใช้เป็นสารละลาย (Solvent) ในงานบางชนิด

7.3.4 ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้น (Prepared Gaseous Fuels)

7.3.4.1 ก๊าซชีวภาพ (Bio-Gas) ได้จากการหมักมูลสัตว์ในที่อับอากาศเป็นกระบวนการที่เรียกว่า Anaerobic Digestion โดยให้แบคทีเรียเป็นผู้ทำงาน ซึ่งจะกินเซลลูโลสเป็นอาหารและคาย ก๊าซมีเทน 55% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 45% จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นได้สรุป คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท ไว้ในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท

รายการ	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	เชื้อเพลิงก๊าซ
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบากในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขนย้ายง่าย	- ก๊าซธรรมชาติขนส่งและขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะพิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักต่ำ - มีจีเถ้ามาก - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ	- คุณภาพค่อนข้างคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง - มีจีเถ้าน้อยมาก - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้จำนวนน้อย - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักของก๊าซ ธรรมชาติสูง - ไม่มีจีเถ้า - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงสุด - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้จำนวนน้อยมาก - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติง่าย
อุปกรณ์เผาไหม้	- ขนาดเล็กไม่ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- มีผลกระทบต่ออากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อหนึ่งหน่วยความร้อน

7.4 การคำนวณค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value)

ค่าความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยทำให้ก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์นั้นเย็นลงจนถึงอุณหภูมิบรรยากาศมีหน่วยเป็น kJ/kg หรือ kJ/m³

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นค่าความร้อนสูง (HHV) และค่าความร้อนต่ำ (LHV) ค่าความร้อนที่รวมความร้อนที่ได้รับจากการควบแน่นของไอน้ำที่ปล่อยไอเสีย ส่วนค่าความร้อนต่ำจะเป็นค่าที่ใช้กันในงานจริง เพราะไม่คำนึงถึงความร้อนที่ได้รับจากการควบแน่นของไอน้ำ สามารถคำนวณจาก

$$\text{LHV} = \text{HHV} - m_w h_{fg} \quad (7-1)$$

หรือ

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 9m_{H_2} h_{fg} \quad (7-2)$$

โดยที่ m_w คือ มวลของไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยของเชื้อเพลิง
 m_{H_2} คือ มวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงในห้องทดลอง เพื่อต้องการทราบ %C, %H, %O, %N, %S และ %เถ้า)
 เลข 9 คือ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของน้ำต่อไฮโดรเจน (H_2O/H_2)
 h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยหรือความดันของไอน้ำที่ความดันย่อยในสารที่ได้จากการเผาไหม้

ถ้าทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิง (C, H, O และ S) จะหา HHV ของเชื้อเพลิงจาก สมการของดูลอง (Dulong's equation) หน่วย MJ/kg

$$\text{HHV} = 33.917C + 143\left(H - \frac{O}{8}\right) + 9.094S \quad (7-3)$$

สำหรับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท ได้สรุปไว้ในตารางที่ 7.2-7.4 และสามารถพิจารณาได้เพิ่มเติมในส่วนของภาคผนวก ก ตารางท้ายหน่วย ก.2 และ ก.6 มาตรฐานกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 7.2 องค์ประกอบและค่าความร้อนสูง (HHV) ของเชื้อเพลิงแข็ง

ชนิดของเชื้อเพลิง	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
ไม้	18
ถ่านหินสีน้ำตาล (brown coal)	21
ถ่านหินบิทูมินัส	29
ถ่านโค้ก	29

หมายเหตุ สารเผาไหม้ไม่ได้ ได้แก่ สารประกอบพวกโลหะ (metal compound) และ ซิลิกอน

ตารางที่ 7.3 องค์ประกอบและค่าความร้อนสูง (HHV) ของเชื้อเพลิงเหลว

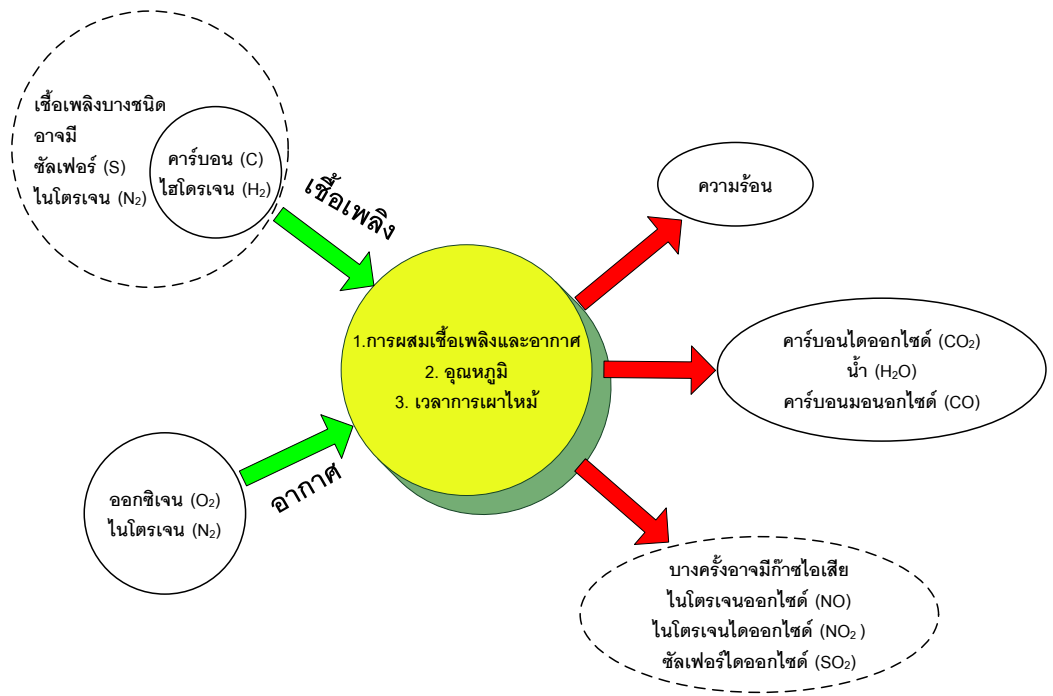
ชนิดของเชื้อเพลิงเหลว	ถ.พ.	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
น้ำมันเบนซิน	0.74	46.5
น้ำมันก๊าด	0.79	46.4
น้ำมันดีเซล	0.84	45.7
น้ำมันเบา	0.90	44.5
น้ำมันเตา	0.98	42.9
เอทิลแอลกอฮอล์	0.79	27.2

ตารางที่ 7.4 องค์ประกอบและค่าความร้อนสูง (HHV) ของเชื้อเพลิงก๊าซ

ชนิดของเชื้อเพลิง	องค์ประกอบ	ค่าความร้อนสูง	
		MJ/m ³	MJ/kg
ก๊าซธรรมชาติ	มีเทน (CH ₄) โดยส่วนใหญ่	37.5	49.3
LPG	โพรเพน (C ₃ H ₈) โดยส่วนใหญ่ และมีบิวเทน (C ₄ H ₁₀) เล็กน้อย	94	50
ไฮโดรเจน	H ₂	12.2	144

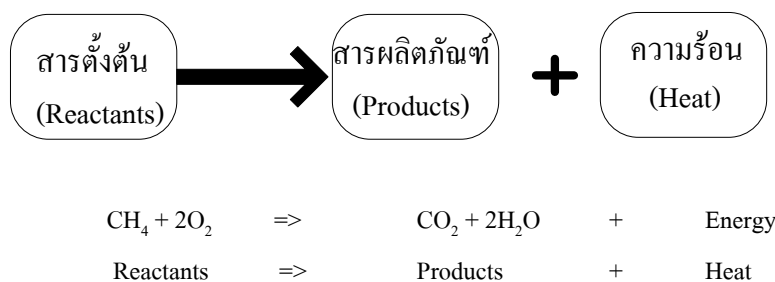
7.5 การเผาไหม้

การเผาไหม้ คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศ เพื่อปล่อยพลังงานความร้อนออกมาสำหรับใช้ประโยชน์ ก๊าซไอเสียร้อนที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ จะประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ที่สำคัญ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ไอน้ำ เหม่าและเชื้อเพลิงบางส่วนที่ไม่ถูกเผาไหม้ เป็นต้น สารที่เหลือจากการเผาไหม้และก๊าซเฉื่อยที่ไม่ถูกเผาไหม้ ซึ่งอาจเกิดสารมลพิษจำพวกกำมะถันออกไซด์ (SO_x) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้ ซึ่งตัวอย่างการเผาไหม้ทั่วไปแสดงดังรูปที่ 7.1 ถ้าเชื้อเพลิงมีสารประกอบของกำมะถันปนอยู่และสารประกอบของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงและก๊าซไนโตรเจนในอากาศถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง แต่ปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจะน้อยมาก ดังนั้น ในทางทฤษฎีการเผาไหม้จึงอาจถือได้ว่า ไนโตรเจนไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับออกซิเจนเลยในระหว่างการเผาไหม้



รูปที่ 7.1 แผนภาพการเกิดการเผาไหม้

ยกตัวอย่างง่ายๆของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนคือก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติกล่าวคือมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆในก๊าซธรรมชาติ เมื่อเกิดการเผาไหม้ซึ่งเมื่อปฏิกิริยาโดยที่แต่ละโมเลกุลของมีเทนเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสองโมเลกุลก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้นมาใหม่คือ หนึ่งโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และสองโมลของน้ำเมื่อปฏิกิริยาเกิดเป็นเช่นนี้แล้วก็จะได้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา นั่นคือความร้อน แสดงดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แผนภาพแสดงสมการและการทำปฏิกิริยาของการเผาไหม้

อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศควรมีอุณหภูมิสูงที่เหมาะสมกับการเผาไหม้ จะช่วยให้การเผาไหม้ได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงเหลวจะต้องมีอุณหภูมิสูงพอที่จะสามารถฉีดเชื้อเพลิงเป็นละอองขนาดเล็กและสามารถเกิดการระเหยได้สะดวกเร็วขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงจะช่วยให้ละออง

เชื้อเพลิงเหลวหรือสารระเหยในเชื้อเพลิงแข็งเกิดการระเหยได้รวดเร็วขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามจะต้องระวังไม่อุ่นน้ำมันจนอุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากส่วนประกอบที่เบาในเชื้อเพลิงอาจจะแยกตัวกลายเป็นไอและเกิดการเผาไหม้ก่อนเวลาขึ้นในหัวเผา ทำให้หัวเผาสกปรกหรือเปลวไฟยาวจนเล็ดออกจากห้องเผาไหม้ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.5

การบำรุงรักษาอุปกรณ์หัวเผา หัวฉีดน้ำมันที่สกปรก ลีกร้อนเสียรูป และการตั้งความดันน้ำมันไม่ถูกต้อง ล้วนมีผลทำให้ความสามารถในการฉีดน้ำมันให้เป็นละอองขนาดเล็กลดลง รวมทั้งการที่หัวเผามีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ต้องดับหัวเผาบ่อยๆ จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดต่ำลงเช่นกัน ในการเดินเครื่องและควบคุม อาจมีปัญหาและข้อขัดข้องเกิดขึ้น สามารถหาแนวทางการแก้ไขได้ดังตารางที่ 7.6 และต้องควบคุมอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาซึ่งสามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.1

ตารางที่ 7.5 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงและอุปกรณ์หัวเผาชนิดต่างๆ

เชื้อเพลิง	ชนิดของหัวเผา	ความหนืดที่เหมาะสม ¹ (St)	อุณหภูมิที่เหมาะสม ¹ (°C)
น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา A	-	-	ไม่จำเป็นต้องอุ่น
น้ำมันเตา C	แบบพ่นฝอยด้วยลมอัด	0.12-0.17	105-120
น้ำมันเตา C	แบบพ่นฝอยด้วยความดัน	0.12-0.20	100-120
น้ำมันเตา C	แบบพ่นฝอยด้วยไอน้ำ	0.20-0.40	80-100
น้ำมันเตา C	แบบถั่วหุมน	0.30-0.60	70-90

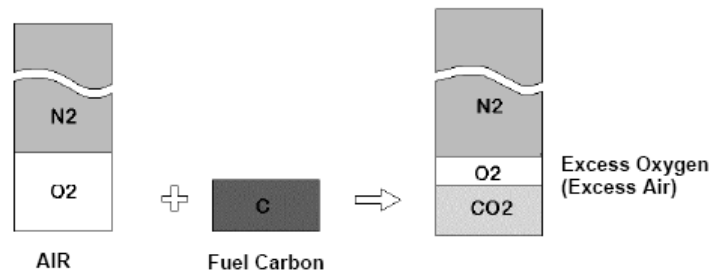
หมายเหตุ¹: เป็นข้อมูลสำหรับน้ำมันเตาของบริษัท Esso สำหรับของบริษัทอื่นอาจจะแตกต่างจากนี้

7.5.1 ความสัมพันธ์ของออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์

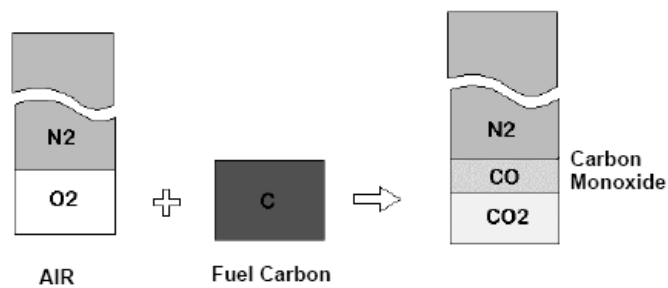
ในการอธิบายในข้างต้น การเผาไหม้อย่างง่ายเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อน ภายใต้สภาวะอุดมคติ ก๊าซที่อยู่ในไอเสียคือคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและไนโตรเจนจากอากาศเผาไหม้ เมื่อมีก๊าซออกซิเจนอยู่ในไอเสีย มันจะหมายถึงมีอากาศเหลือจากการเผาไหม้หรือมีอากาศส่วนเกินกล่าวคือใช้อากาศเผาไหม้เกินกว่าปริมาณอากาศที่เผาไหม้แล้วเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 อีกกรณีเมื่อมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในไอเสีย มันจะหมายถึงมีอากาศไม่พอจากการเผาไหม้หรือมีอากาศน้อยเกินกว่าคือใช้อากาศเผาไหม้น้อยกว่าปริมาณอากาศที่เผาไหม้แล้วเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7.4

ตารางที่ 7.6 การตรวจวิเคราะห์ข้อขัดข้องและแนวทางแก้ไขในระบบเผาไหม้

ข้อขัดข้อง	สาเหตุ	แนวทางแก้ไข
จุดไฟไม่ติด	ไม่มีน้ำมัน	ตรวจสอบดูการจ่ายน้ำมัน
	มีน้ำและตะกอนปนอยู่ในน้ำมันมากเกินไป	ติดตั้งตัวกรองในท่อจ่ายน้ำมัน และทำการถ่ายทิ้งถึงน้ำมันและปลายสายเป็นครั้งคราว
	การอุดตันของหัวเผา	ทำความสะอาดหัวเผาสม่ำเสมอ ตรวจสอบการไหลของน้ำมันขณะที่จุดไฟ
	อุณหภูมิของน้ำมันไม่สูงพอ	ตรวจสอบการทำงานของเครื่องอุ่นน้ำมัน ให้อุ่นน้ำมันได้ตามที่ต้องการ เพิ่มความดันน้ำมันเพื่อช่วยการปล่อยของน้ำมัน
	อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิสูงเกินไป	ปรับปริมาณอากาศตามข้อกำหนดของหัวเผานั้น ๆ
เปลวไฟไม่สม่ำเสมอ	มีน้ำและตะกอนปนอยู่ในน้ำมันมากเกินไป	ติดตั้งตัวกรองในท่อจ่ายน้ำมัน และทำการถ่ายทิ้งถึงน้ำมันและปลายสายเป็นครั้งคราว
	ความหนืดน้ำมันสูงเกินไป	เพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นน้ำมัน และ/หรือเพิ่มความดันในการฉีดพ่นน้ำมัน
	ความดันของอากาศหรือน้ำมันไม่สม่ำเสมอ	ตรวจสอบหรือติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความดัน
	มีอากาศในท่อจ่ายน้ำมัน	ติดตั้งตัวระบายอากาศในท่อน้ำมัน
มีการสะสมของคาร์บอนที่หัวเผา	ความหนืดน้ำมันสูงเกินไป	เพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นน้ำมัน และ/หรือเพิ่มความดันในการฉีดพ่นน้ำมัน
	การฉีดน้ำมัน/อากาศไม่ดี	ปรับปริมาณอากาศปฐมภูมิให้เหมาะสม
	น้ำมันไหลไม่สม่ำเสมอ	รักษาความดันและอุณหภูมิของน้ำมันให้คงที่
	เกิดการรั่วซึมของน้ำมันหลังจากดับไฟแล้ว	เป่าน้ำมันที่ตกค้างในหัวเผาทิ้งให้หมดจดที่สุดเท่าที่จะทำได้
	การพ่นฝอยน้ำมันไม่สม่ำเสมอ	ตรวจสอบการอุดตันหรือสึกกร่อนของหัวฉีดน้ำมัน
เขม่าควันมาก	ปริมาณอากาศน้อยเกินไป	เพิ่มปริมาณอากาศให้เหมาะสม
	การพ่นฝอยน้ำมันไม่ดี	ตรวจสอบหัวฉีดให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ และควบคุมความดันและอุณหภูมิน้ำมันให้ถูกต้องสำหรับน้ำมันที่ใช้

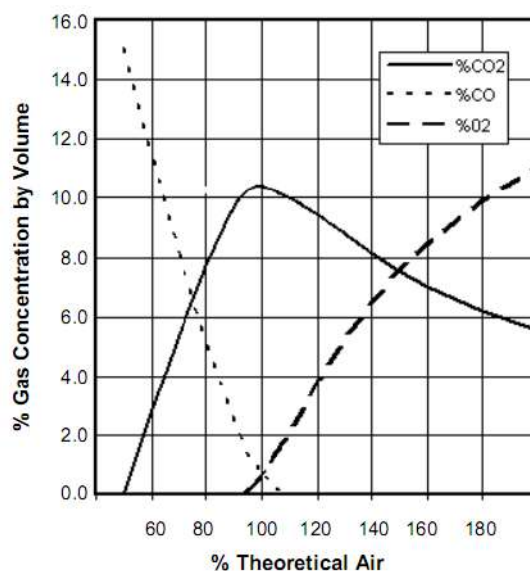


รูปที่ 7.3 ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือหลังจากการเผาไหม้เนื่องจากมีอากาศส่วนเกิน



รูปที่ 7.4 การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียแสดงได้ดังรูปที่ 7.5 พบว่าในขณะที่ปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้ 100% ของอากาศทางทฤษฎี



รูปที่ 7.5 ความเข้มข้นของก๊าซเผาไหม้ที่สัดส่วนปริมาณอากาศทางทฤษฎี

ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้ปริมาณออกซิเจนนั้นมีเพียงพอในการก่อตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีปริมาณมากที่สุดที่ตำแหน่ง 100% ของอากาศทางทฤษฎี หลังจากนั้นปริมาณอากาศมีมากกว่าอากาศทางทฤษฎี ($> 100\%$) เป็นเหตุให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียนั้นลดลงและมีก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นทั้งนี้เมื่ออากาศส่วนเกินเข้าไปเผาไหม้กับเชื้อเพลิงทำให้มีก๊าซออกซิเจนในอากาศหลงเหลืออยู่ในก๊าซไอเสีย อีกทั้งพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้อีกด้วย

7.5.2 หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner)

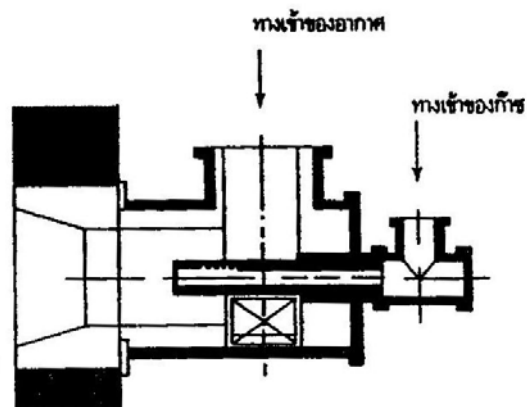
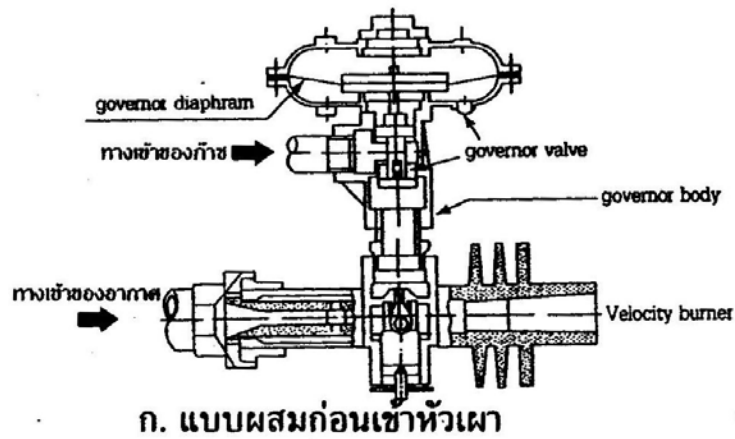
หัวเผาเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเข้าเผาไหม้ในอัตราส่วนที่สัมพันธ์กัน และต้องคลุกเคล้ากันได้อย่างทั่วถึงในทุกภาระการทำงาน หัวเผาเชื้อเพลิงที่ได้รับการออกแบบมาดี จะช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้โดยองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์นั้นจะเป็นดังนี้

- (ก) มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างทั่วถึง
- (ข) มีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้พอเพียง เพื่อไม่ให้สูญเสียเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ ออกไปจากห้องเผาไหม้
- (ค) มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในระหว่างเกิดการเผาไหม้สูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับสัดส่วนของปริมาณน้ำมันกับอากาศ เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าจุดติดไฟของเชื้อเพลิง

การควบคุมให้เกิดการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นไปอย่างทั่วถึง และมีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้พอเพียงนั้นสามารถทำได้โดยการใช้หัวฉีด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญเพื่อทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงแตกตัวเป็นฝอยเล็กๆ แล้วพ่นเข้าไปผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ขนาดของฝอยน้ำมันยิ่งเล็กลงก็จะใช้เวลาในการเผาไหม้ลดลง นอกจากนั้นยังช่วยให้เกิดการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีส่งผลให้สามารถลดขนาดของห้องเผาไหม้ที่ต้องการใช้ลงได้

7.5.2.1 หัวเผาเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงก๊าซแบ่งเป็น 2 แบบดังรูป 7.6 และรายละเอียดมีดังนี้

1. แบบ pre-mix burner คือ แบบที่ผสมเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนแล้วป้อนเข้าเผาไหม้แบบนี้ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงจะควบคุมได้ดี แต่มีข้อควรระวังคือ การเกิดเปลวไฟย้อนกลับและเปลวไฟไม่นิ่ง
2. แบบ nozzle mix burner คือ แบบผสมกันภายในหัวเผาแบบนี้ปริมาณอากาศส่วนเกินจะสูงกว่า และการที่อากาศและเชื้อเพลิงแยกกัน ทำให้สามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ได้ดี



รูปที่ 7.6 หัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซ ก) แบบผสมก่อนเข้าหัวเผาไหม้ ข) แบบผสมกันภายในหัวเผา

7.5.2.2 หัวเผาน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก รูปที่ 7.7 และลักษณะการใช้งานหัวเผาแบบต่างๆพิจารณาได้ดังตารางที่ 7.7 โดยมี รายละเอียดพอสังเขปได้ดังนี้

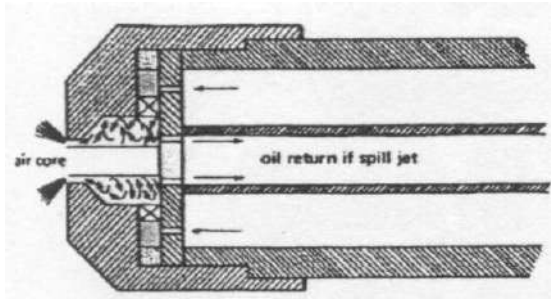
1. ชนิดของไหลคู่ (Twin-Fluid Atomizer) เป็นหัวเผาที่ใช้ลมหรือไอน้ำเพื่อฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงให้เป็นฝอย หลักการทำงานของหัวเผาแบบนี้คือจะมีน้ำมันไหลผ่านในท่อขนาดเล็กซึ่งวางเรียงตัวกันอยู่ด้านในของท่อใหญ่โดยมีอากาศหรือไอน้ำภายใต้ความดันสูงไหลผ่านในท่อด้านนอก ที่ปลายท่อทั้งสองน้ำมันและอากาศหรือไอน้ำจะถูกเป่าให้กระทบกันจึงทำให้น้ำมันแตกตัวเป็นฝอยเล็กๆ หัวเผาแบบนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามความดันของลมหรือไอน้ำที่ใช้ในการเป่ากระทบให้น้ำมันเป็นฝอย

- 1.1) หัวเผาแบบความดันต่ำ (Low Pressure Burner) ใช้อากาศความดันประมาณ 1.08 บาร์ ปริมาณของอากาศที่เป่ากระทบเท่ากับ 25-40% ของ

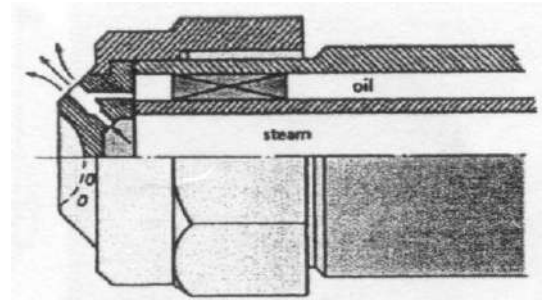
อากาศที่ต้องการใช้เพื่อทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์เหมาะสมสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง

- 1.2) หัวเผาแบบความดันปานกลาง (Medium Pressure Burner) ใช้อากาศความดันระหว่าง 1.25-2.0 บาร์ ในการเป่ากระทบบ ปริมาณอากาศที่ใช้เป่ากระทบเท่ากับ 3-5% ของอากาศทั้งหมดที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์หัวเผาประเภทนี้ส่วนใหญ่จะนำมาใช้กับเตาถลุงโลหะ
- 1.3) หัวเผาแบบความดันสูง (High Pressure Burner) ใช้อากาศที่มีความดันประมาณ 2.00-4.45 บาร์ โดยมีปริมาณของอากาศที่ใช้ใกล้เคียงกับหัวเผาแบบความดันปานกลาง

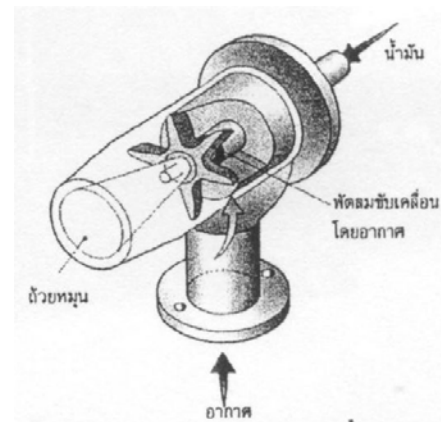
2. ชนิดทำให้เป็นฝอยเชิงกล (Pressure Atomizer) หรือแบบใช้ความดันของน้ำมันเพื่อฉีดให้เป็นฝอย (Oil Pressure Burner) หัวเผาแบบนี้เหมาะสำหรับหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ เช่น ในเรือเดินสมุทรและในโรงจักรไฟฟ้า หัวเผาชนิดนี้ทำงานโดยการปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้ความดันสูง (70-300 PSI) และมีความหนืดต่ำประมาณ 50-120 sec Redwood No.1 (ส่วนใหญ่จะต้องมีการอุ่นน้ำมันให้ร้อนเพื่อลดความหนืดก่อนที่จะป้อนเข้าหัวเผา) ผ่านไปยังรูเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลของการเผาไหม้ที่ดีน้ำมันจะถูกอัดผ่านช่องทางเล็กๆ ใน Swirl Chamber ทำให้ฝอยน้ำมันที่ออกมามีความเร็วทั้งที่พุ่งไปข้างหน้าและความเร็วหมุนรอบตัว (Rotational velocity) การผสมกันระหว่างน้ำมันกับอากาศก็จะยิ่งดีขึ้น หัวเผาแบบนี้ใช้งานได้สะดวกเพราะสามารถปรับความดันและอัตราการไหลของน้ำมันได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือรูของหัวเผามักจะมีฝุ่นผงหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ไปอุดตันบ่อย จึงต้องทำความสะอาดบ่อย และทำความสะอาดใส่กรองน้ำมันด้วย



ก) แบบใช้ความดันน้ำมัน



ข) แบบใช้อากาศหรือไอน้ำฉีด



ค) แบบใช้โรตารีคัพ

รูปที่ 7.7 หัวเผาเชื้อเพลิงเหลว ก) แบบใช้ความดันน้ำมัน ข) แบบใช้อากาศหรือไอน้ำฉีดน้ำมัน และ ค) แบบใช้โรตารีคัพ

- ชนิดโรตารี (Rotary Cup Burner) หรือชนิดถ้วยเหียงที่ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อกระจายน้ำมันให้เป็นฝอย การทำงานของหัวเผานี้คือ น้ำมันจะถูกป้อนทางด้านในของกรวยที่กำลังหมุนรอบแกน แรงหนีศูนย์กลางจะทำให้ น้ำมันถูกเหวี่ยงไปอยู่ด้านขอบของกรวย และกระจายออกจากปลายกรวยในขณะที่อากาศถูกเป่ามาปะทะ ทำให้ละอองน้ำมันที่กระจายออกมาเป็นฝอยเล็กๆ หัวเผาแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับน้ำมันที่มีความหนืดสูง

หัวเผาน้ำมันทุกประเภทจะมีหลักการทำงานที่เหมือนกันซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ

- Filming คือขั้นตอนทำให้น้ำมันก่อตัวเป็นแผ่นบางมากๆ

2. Disintegration คือขั้นตอนทำให้แผ่นน้ำมันบาง (Oil film) แตกกระจายเป็นอนุภาคเล็กๆ โดยอาศัย ความไม่เสถียรที่มีอยู่ในตัวของแผ่นน้ำมันบางเองหรือโดยใช้ของไหลอื่นมาทำให้แตกตัว

ตารางที่ 7.7 ลักษณะการใช้งานหัวเผาแบบต่างๆ

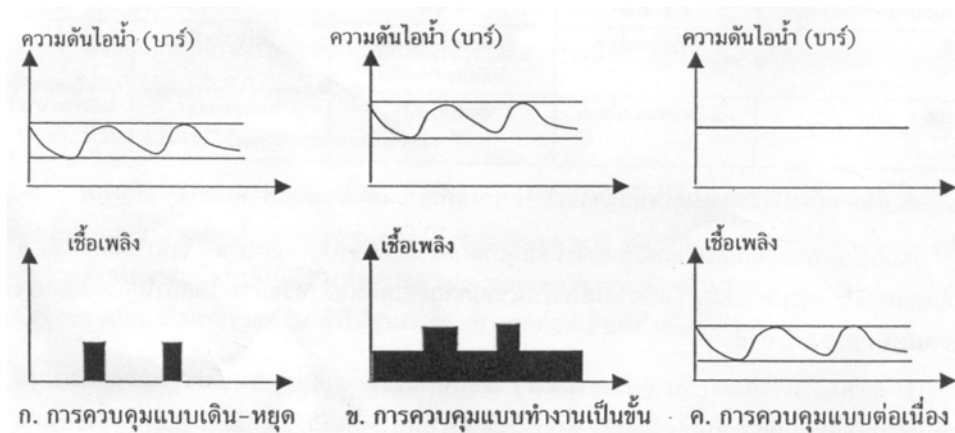
	แบบใช้ความดันอากาศ / ไอน้ำฉีดน้ำมัน		แบบความดันน้ำมัน	แบบโรตารีคัพ
	ความดันต่ำ	ความดันสูง		
พิกัดการใช้เชื้อเพลิง (L/h)	1.5 – 180	10 – 5,000	50 – 10,000	10 – 300
ตัวกลางที่ใช้	อากาศ / ไอน้ำ	อากาศ / ไอน้ำ	-	-
ความดันน้ำมัน (barg)	0.1 – 1	0.2 – 9.0	14 – 18	0.5 – 10
ความดันในการฉีด(barg)	0.4 – 2.0	2 – 10	-	1 – 3
ข้อดี	ค่าใช้จ่ายต่ำ	ฉีดน้ำมันได้ละเอียด ไม่มีปัญหาอุดตัน	ค่าใช้จ่ายต่ำ เงียบ	ค่าใช้จ่ายต่ำ
ข้อเสีย	ต้องใช้พัดลม / ปั๊มลม	ต้องใช้ไฟฟ้า	ตอบสนองช้า ต้องใช้ปั๊ม	มีเฉพาะขนาดใหญ่

7.5.2.3 การทำงานของหัวเผาในระบบหม้อไอน้ำ

หัวเผาหม้อไอน้ำมีการทำงานด้วยกัน 3 รูปแบบได้แก่

1. แบบเดิน – หยุด (on – off control) ซึ่งจะจุดและดับตามความดันของไอน้ำที่ผลิต
2. แบบทำงานเป็นขั้น (step control) การจุดหัวเผาจะเป็นลำดับตามภาระการผลิตไอน้ำเช่น เดิน 2 หัว หรือ 3 หัว
3. แบบต่อเนื่อง (modulating control) ปริมาณน้ำมันและอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความต้องการใช้ไอน้ำอย่างต่อเนื่อง

การควบคุมการทำงานของหัวเผาในระบบหม้อไอน้ำทั้ง 3 รูปแบบนี้สามารถพิจารณาแต่ละแบบได้ดังรูปที่ 7.8



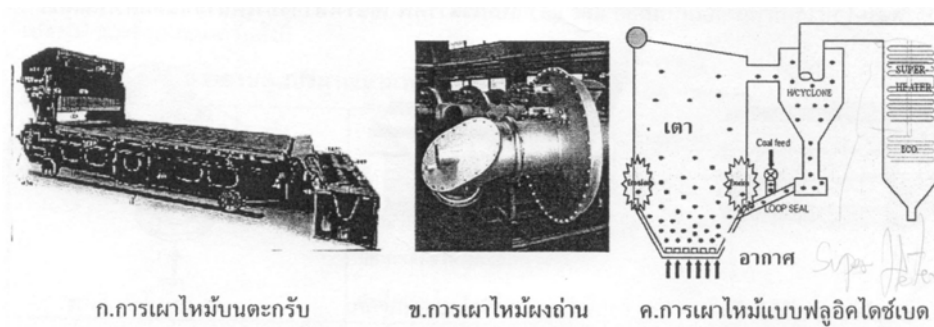
รูปที่ 7.8 การควบคุมหั่วเผา ก) แบบเดิน-หยุด ข) แบบทำงานเป็นขั้น และ ค) แบบต่อเนื่อง

การปรับแต่งหั่วเผาเพื่อให้หม้อไอน้ำทำงานมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงสุด สามารถพิจารณาขั้นตอนต่างๆได้ในภาคผนวก ง. แผนผังการตรวจสอบการเผาไหม้

7.5.2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งเป็นที่นิยมใช้ในการเผาไหม้ในระบบหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วเชื้อเพลิงแข็งจะมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงเหลวและก๊าซ จึงทำให้มีการใช้งานแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน การป้อนเชื้อเพลิงแข็งไม่ได้ใช้หั่วเผาเหมือนเชื้อเพลิงเหลวและก๊าซ โดยทั่วไปเชื้อเพลิงแข็งจะมีการเผาไหม้อยู่ 3 วิธีซึ่งสามารถพิจารณาตัวอย่างได้ดังรูปที่ 7.9 และมีรายละเอียดโดยคร่าวๆ ดังนี้

1. การเผาไหม้บนตะกรับ (grate stoker) เชื้อเพลิงแข็งจะวางอยู่บนตะกรับ และเกิดการเผาไหม้ ตะกรับมีทั้งแบบอยู่กับที่และแบบเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นสายพานโซ่ ถ่านหินจะถูกป้อนเข้าด้านหนึ่งของสายพานแล้วเคลื่อนที่ไปตามความยาวของก่องเผาไหม้หรือเตาเผา อากาศเข้าเผาไหม้ส่วนหนึ่งเข้าจากทางด้านล่างของตะกรับ การเผาไหม้แบบนี้ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด ใช้ได้กับเชื้อเพลิงแข็งที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่
2. การเผาไหม้แบบใช้ผงถ่าน การเผาไหม้แบบนี้จะบดถ่านหินจนเป็นผงละเอียดไม่เกิน 50 ไมครอน แล้วพ่นเข้าไปในห้องเผาไหม้คล้ายกับหั่วเผาของเชื้อเพลิงเหลว
3. การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่ทันสมัยที่สุด โดยใช้อากาศเป่าเชื้อเพลิงให้เคลื่อนที่ไหลแล้วเผาไหม้หรือเป่าทรายทนไฟให้คลุกเคล้ากับเชื้อเพลิง ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ต่ำซึ่งเตาจะมีขนาดเล็กและเกิดมลภาวะน้อย



รูปที่ 7.9 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ก) บนตะแกรง ข) แบบผงถ่าน และ ค) แบบฟลูอิดไดซ์เบด

7.5.2.5 การบำรุงรักษาหัวเผา

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว เราต้องฉีดเชื้อเพลิงให้เป็นละออง เพื่อทำการผสมกับอากาศ แต่ถ้าการบำรุงรักษาหัวเผาไม่ดีพอจะเกิดการรับอนุภาคน้ำมันที่ปลายของหัวเผา การแตกตัวเป็นละอองด้อยลง เช่น ขนาดละอองโตขึ้น รูปแบบการกระจายละอองด้อยลง ทำให้การผสมเหลวลง ผลก็คือก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และเกิดบริเวณที่มีอากาศไม่เพียงพอเพราะการกระจายของละอองของเหลวไม่สม่ำเสมอ ในกรณีที่เลวร้ายกว่านั้น รูปร่างเปลวไฟเปลี่ยนอย่างมาก เปลวไฟไปกระทบกระเบื้องหัวเผา (Burner tile) โดยตรง เกิดการสะสมของคาร์บอนบนกระเบื้อง ดังนั้นการบำรุงรักษาหัวเผาให้ถูกต้องจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ นอกจากนั้นควรบำรุงรักษาหัวเผาและอุปกรณ์ช่วยเหลือนการเผาไหม้ต่างๆ ให้อยู่ในสภาพที่ดีอยู่เสมอ ดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 การดูแลรักษาหัวเผาและอุปกรณ์ช่วยเหลือนการเผาไหม้ต่างๆ

อุปกรณ์	วิธีการตรวจสอบ
ถังเก็บน้ำมันเตา	- ควรตรวจและถ่ายน้ำและตะกอนเหนียวออก จากก้นถังอยู่เสมอ
ระบบส่งน้ำมัน	- ควรตรวจและทำความสะอาดหัวกรองน้ำมันเป็นประจำ อย่าให้อุดตัน ขนาดรูหัวกรองน้ำมันต้องเหมาะสม - ควรตรวจความดันปั้มน้ำมันว่าปกติหรือไม่ หากความดันต่ำไป ตัวปั้มอาจชำรุดหรือสกปรกหรือหัวกรองด้านหน้าปั้มอาจอุดตัน - ตรวจดูว่าหัวอุ่นน้ำมันเตาทำงานเป็นปกติหรือไม่ อุณหภูมิของน้ำมันเตาที่ออกจากหัวอุ่นสูงพอตามความต้องการหรือไม่
หัวเผา	- ควรตรวจความดันของน้ำมันเตา ความดันลม / ไอน้ำว่าได้ตามข้อบ่งชี้หรือไม่ - ควรตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำมันที่เข้าหัวฉีดว่าได้ตามข้อบ่งชี้หรือไม่

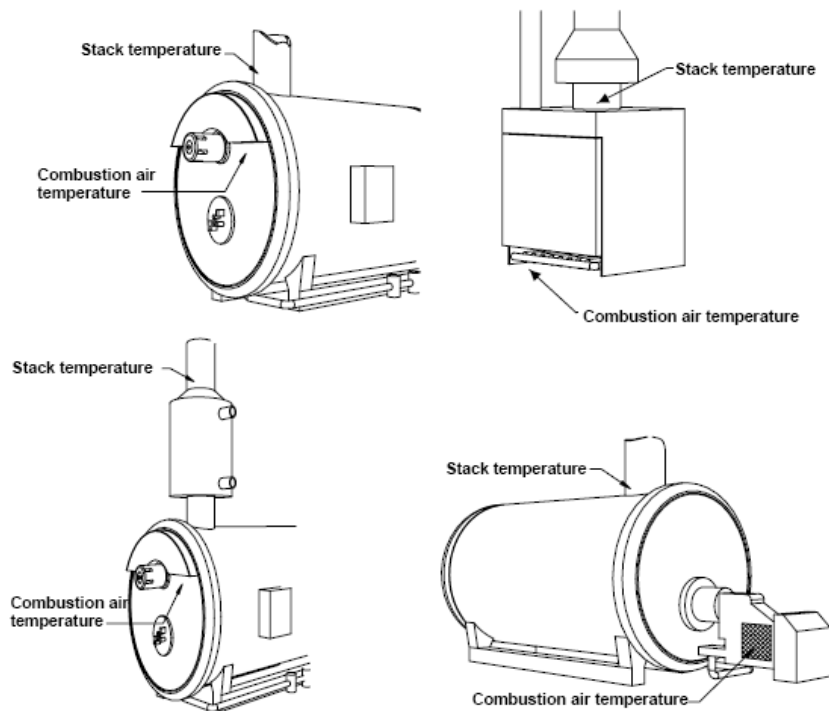
	- ควรทำความสะอาดหัวเผาเป็นประจำ สำหรับพวกหัวฉีดที่ใช้ความดันของน้ำมันเตาเองนั้นต้องระวังอย่าให้ร่องต่างๆที่ปลายหัวฉีดเกิดบิดเบี้ยวหรือชำรุดได้ ไม่ควรใช้เหล็กแข็งขูดทำความสะอาด ส่วนหัวเผาแบบถั่วเหวียง ใช้ผ้าชุบน้ำมันสนเช็ดทำความสะอาด ถ้าหากมีคราบคาร์บอนให้ใช้มีดอคูมิเนียมที่มากับหัวเผาทำความสะอาด ห้ามใช้วัสดุที่เป็นเหล็กหรือสแตนเลสทำความสะอาดเพราะจะทำให้เกิดรอยภายในถั่ว - ควรตรวจสอบสภาพของช่องบังคับลมอยู่เสมอ หากชำรุดให้รับซ่อมแซมให้ดังเดิม - ตรวจสอบสภาพของช่องหัวเผา หากอิฐทนไฟแตกหักและหล่นลงมาให้รับแก้ไข - ตรวจสอบข้อต่อที่เชื่อมกันบังคับช่องลมกับวาล์วน้ำมัน อย่าให้หลวมหรือหลุด - ตรวจสอบปริมาณของอากาศที่เข้าหัวเผา ไม่ควรเกินกว่า 1.2 เท่าของจำนวนอากาศตามทฤษฎีการเผาไหม้ โดยดูจากปริมาณ O_2 ส่วนเกินในก๊าซไอเสียซึ่งไม่ควรเกินร้อยละ 3.5 หรือดูจากปริมาณ CO_2 ซึ่งไม่ควรเกินกว่าร้อยละ 12.5
--	--

7.5.3 การวิเคราะห์การเผาไหม้

การวิเคราะห์การเผาไหม้เป็นกระบวนการที่สำคัญเนื่องจากต้องทราบพารามิเตอร์ไปวิเคราะห์เพื่อที่ต้องการนำข้อมูลที่วัดได้ไปทำการปรับแต่งค่า (tune-up) ของหม้อไอน้ำ บางครั้งอาจจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานการเผาไหม้มาประกอบกับการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้หรือประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเป็นต้น ในหลักปฏิบัติในส่วนใหญ่มักใช้เครื่องมือวัดไอเสียหรือเครื่องมือวัดการเผาไหม้ ซึ่งการบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นนั้นได้แก่ ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้า ความดันแตกต่าง (draft) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้นหรืออาจมีมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือวัดที่ใช้ โดยที่การวัดไอเสียนั้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของการวัดไอเสียที่เหมาะสมทั้งในส่วนของหม้อไอน้ำและที่เตาเผาซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.10 และ 7.11 ตามลำดับ



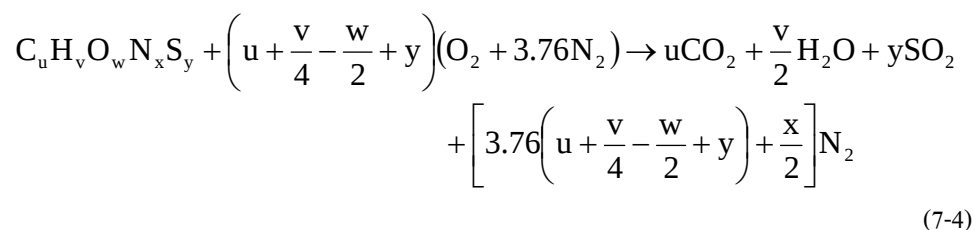
รูปที่ 7.10 ตำแหน่งการวัดไอเสียของหม้อไอน้ำที่เหมาะสม



รูปที่ 7.11 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิไอเสียที่ปล่องและอุณหภูมิอากาศเผาไหม้ของหม้อไอน้ำและเตาเผา

7.5.4 ทฤษฎีสตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry Theory)

สตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้เป็นเรื่องเกี่ยวกับดุลของมวลในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ช่วยให้สามารถคำนวณหาปริมาณของออกซิไดเซอร์หรืออากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ การทำสตอยคิโอเมตรีจำเป็นต้องทราบลักษณะการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเสียก่อนซึ่งการรายงานผลการวิเคราะห์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะของเชื้อเพลิงเช่น เชื้อเพลิงก๊าซจะใช้การวิเคราะห์โดยประมาณและรายงานผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละโดยปริมาตรหรือโมลของแต่ละก๊าซที่เป็นองค์ประกอบในก๊าซเชื้อเพลิงผสมนั้น ส่วนเชื้อเพลิงแข็งหรือเหลวจะใช้การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและรายงานผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละโดยมวลของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น เช่น C, H, O, N และ S เป็น สูตรสำเร็จรูปขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์เขียนเป็นสัญลักษณ์โดยย่อดังนี้ CHONS (เชื้อเพลิง) -อากาศ ดังสมการที่ (7-4)



โดยที่ u, v, w, x และ y คือจำนวนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ และเลข 3.76 คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนโมลของไนโตรเจนต่อหนึ่งโมลของออกซิเจนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ 0.79/0.21

การคำนวณหามวลของเชื้อเพลิง เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีมวลโมเลกุลดังนี้ C มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12, H มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 1, O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 16, N มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 14 และ S มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 32 ดังนั้นสามารถหามวลของเชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (7-5) นี้

$$m_f = (12 \times u) + (1 \times v) + (16 \times w) + (14 \times x) + (32 \times y) = 12u + v + 16w + 14x \quad (7-5)$$

โดยที่ m_f คือ มวลของเชื้อเพลิง และทำนองเดียวกันกับมวลของอากาศหาได้จากสมการที่ (7-6)

$$m_a = (137.28) \left(u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right) \quad (7-6)$$

โดยที่ m_a คือ มวลของอากาศ

จากสมการที่ (7-4) อยู่ในสมมุติฐานโดยกำหนดให้อากาศประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน 21% และก๊าซไนโตร 79% ส่วนอากาศ

7.5.5 นิยามสำคัญเกี่ยวกับการเผาไหม้

7.5.5.1 ไอดีสตอยคิโอเมตริก (Stoichiometric mixture) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อมวลทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเผาไหม้ทางทฤษฎีหรือตามสตอยคิโอเมตริกของการเผาไหม้ ดังสมการที่ (7-7)

ไอดีสตอยคิโอเมตริก;

$$Y_m \quad Y_m = \frac{m_f}{m_r} \quad (7-7)$$

โดยที่ Y_m คือไอดีสตอยคิโอเมตริก

m_r คือ มวลของสารตั้งต้น (มวลของเชื้อเพลิงรวมกับมวลของอากาศ)

7.5.5.2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีหรือ $(A/F)_{\text{stoi}}$ คืออัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยมวลทางทฤษฎีหรือตามสตอยคิโอเมตริกของการเผาไหม้ ดังสมการที่ (7-8)

$$(A/F)_{\text{stoi}} = \frac{m_a}{m_f} \quad (7-8)$$

7.5.5.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio; ϕ) คือปริมาณไ้หน่วยที่นิยามใช้ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวบอกให้ทราบว่าส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์นั้นมีความใกล้เคียงหรือห่างไกลจากค่าทางทฤษฎีมากน้อยแค่ไหนอย่างไร อัตราส่วนสมมูลมีสองชนิดโดยชนิดแรกคือ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (Fuel equivalence ratio; ϕ_f) ดังสมการที่ (7-9)

$$\phi_f = \frac{(m_f / m_a)_{\text{actual}}}{(m_f / m_a)_{\text{stoi}}} = \frac{(n_f / n_a)_{\text{actual}}}{(n_f / n_a)_{\text{stoi}}} \quad (7-9)$$

ส่วนชนิดที่สองคืออัตราส่วนสมมูลออกซิไดเซอร์ (Oxidizer equivalence ratio; ϕ_o) ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงตามสมการที่ (7-10)

$$\phi_o = \frac{1}{\phi_f} \quad (7-10)$$

ดังนั้นจากสมการเหล่านี้สามารถระบุได้ดังนี้

ถ้า $\phi_f < 1$ หรือ $\phi_o > 1$ หมายความว่าไอดีบาง (Fuel-lean Mixture)

ถ้า $\phi_f > 1$ หรือ $\phi_o < 1$ หมายความว่าไอดีหนา (Fuel-rich Mixture)

ถ้า $\phi_f = \phi_o = 1$ หมายความว่าไอดีเป็นไปตามสโตยคิโอมेटรี

(Stoichiometry)

7.5.5.4 เปอร์เซนต์อากาศทางทฤษฎี (Percent Theoretical Air) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอัตราส่วนอากาศ (Air ratio) ก็ได้คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซนต์ของปริมาณอากาศทางทฤษฎีหรือตามสโตยคิโอมेटรีการเผาไหม้ ดังสมการที่ (7-11)

$$\text{เปอร์เซนต์อากาศทางทฤษฎี (\%TA)} \quad \%TA = \frac{100}{\phi_f} = 100\phi_o \quad (7-11)$$

เช่น $\phi_f = 0.8$ หรือ $\phi_o = 1.25$ ดังนั้นเปอร์เซนต์อากาศทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 125 จากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

7.5.5.5 เปอร์เซนต์อากาศส่วนเกิน (Percent Excess Air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซนต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 ดังสมการที่ (7-12)

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%EA)

$$\%EA = \frac{100}{\phi_f} - 100 = 100\phi_o - 100 \quad (7-12)$$

ในกรณีคำนวณปริมาณอากาศส่วนเกินจากการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดไอเสีย
สามารถใช้สมการที่ (7-13)

$$\% \text{ Excess Air} = \frac{\% O_2 \text{ measured}}{20.9 - \% O_2 \text{ measured}} \times 100 \quad (7-13)$$

ถ้ามีปริมาณ CO มากก็สามารถนำมาคิดคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (7-14)

$$\% \text{ Excess Air} = \frac{\% O_2 - \frac{\% CO}{2}}{20.9 - \left(\% O_2 - \frac{\% CO}{2} \right)} \times 100 \quad (7-14)$$

อากาศส่วนเกินยังสามารถถูกแสดงได้อีกในรูปแบบหนึ่งคือ แลมดา (λ) ดังสมการที่
(7-15)

$$\lambda = \frac{\% \text{ Excess Air}}{100} + 1 \quad (7-15)$$

7.6 หลักปฏิบัติในการวิเคราะห์การเผาไหม้

7.6.1 การตรวจวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้

เครื่องมือวิเคราะห์แก๊สไอเสียได้รับการพัฒนาไปอย่างมากเพื่อให้ใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว เพิ่มประสิทธิภาพในการวัด โดยเฉพาะรุ่นพกพาดังแสดงดังรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 เครื่องมือตรวจวัดการเผาไหม้

โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือวิเคราะห์ไอเสียควรมีคุณลักษณะดังนี้

- 7.6.1.1 สามารถวัด O_2 , CO
- 7.6.1.2 สามารถวัดกระแสลมแรงในปล่องควัน
- 7.6.1.3 สามารถวัดความดันสูญเสีย (ΔP)
- 7.6.1.4 สามารถวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย
- 7.6.1.5 สามารถวัด CO ได้ระหว่าง 0-10,000 ppm
- 7.6.1.6 สามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ CO_2 , ประสิทธิภาพการเผาไหม้, การสูญเสียความร้อนจากไอเสีย และค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน
- 7.6.1.7 ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่
- 7.6.1.8 สามารถแสดงผลบนจอ LCD และสั่งพิมพ์ผลได้

7.6.2 การตรวจวัด Stack Loss

การสูญเสียความร้อนทางแก๊สไอเสียสามารถคำนวณได้โดยการวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย และวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียหลักการในการคิดประสิทธิภาพการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำมีดังนี้

- 7.6.2.1 อุณหภูมิของแก๊สร้อนที่ออกจากตัวหม้อไอน้ำจะแสดงว่าปริมาณความร้อนจากแก๊สร้อนสามารถถ่ายเทให้กับน้ำได้ดีเพียงไร หม้อไอน้ำจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนนี้ไปสู่น้ำเพื่อให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ ถ้าหม้อไอน้ำสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำได้มากปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกจากไอเสียก็จะน้อย ซึ่งจะสังเกตได้จากอุณหภูมิไอเสียที่ต่ำ

- 7.6.2.2 %CO₂ ในแก๊สไอเสียจะบ่งชี้ว่าการเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงเพียงใดถ้าเชื้อเพลิงเผาไหม้ได้หมดโดยใช้อากาศส่วนเกินน้อยที่สุดจะได้ความร้อนจากแก๊สร้อนสูงสุด ดังนั้นถ้าตรวจวัดได้ว่าไอเสียมี %CO₂ สูงสุด หรือ %O₂ ต่ำสุด ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะดีที่สุด
- 7.6.2.3 การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนและลมหมุนเวียนเป็นค่าความร้อนที่สูญเสียจากตัวหม้อไอน้ำเนื่องจากการกระจายความร้อนออกรอบๆ ตัวหม้อไอน้ำ และการพาความร้อนจากลมที่พัดผ่านตัวหม้อไอน้ำ ซึ่งการสูญเสียความร้อนตัวนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและความดันของไอน้ำในหม้อไอน้ำ

7.6.3 วิธีการคำนวณประสิทธิภาพของการเปลี่ยนเชื้อเพลิงให้เป็นไอน้ำ โดยการวัดอุณหภูมิที่ปล่องและวัดปริมาณของ CO₂

วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน และเป็นวิธีการที่ยอมรับกันอยู่โดยทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ที่ต้องการใช้มีดังนี้

- 7.6.3.1 เครื่องวัด CO₂ และ O₂
- 7.6.3.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ปล่องไอเสีย
- 7.6.3.3 เครื่องมือวัดอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ
- 7.6.3.4 ตารางสำหรับคำนวณการสูญเสียทางปล่อง สำหรับเชื้อเพลิงต่างๆซึ่งพิจารณา

เพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.7- ก.12

- 7.6.3.5 ตารางสำหรับความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อน (RADIATION & CONVECTION)

- 7.6.3.6 ขั้นตอนการหาปริมาณการสูญเสียความร้อนจากไอเสีย

- ก) ทราบชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ตลอดทั้งปี จากการบันทึกข้อมูลของหม้อไอน้ำที่โรงงานบันทึกไว้
- ข) ตรวจวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของตารางที่ผู้ใช้มี จากเครื่องมือวัดโดยวัดที่ตำแหน่งดังรูปที่ 7.10

- ค) ตรวจวัดอุณหภูมิไอเสียออกจากปล่องโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิไอเสียที่ตำแหน่งดังรูปที่ 7.11

- ง) ใช้ตารางในภาคผนวก ก.7-ก.12 โดยแต่ละตารางขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียแล้วนำปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิไอเสียไปเปิดตาราง ซึ่งจะได้ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องไอเสีย

- 7.6.3.7 ตัวอย่างการหาร้อยละการสูญเสียความร้อน

โรงงานแห่งหนึ่งติดตั้งหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ 10 ton/hr ใช้น้ำมันเตาเกรด C เป็นเชื้อเพลิง จากการตรวจวัดในตอนแรกพบว่าปริมาณออกซิเจนส่วนเกินวัดได้ 9% และอุณหภูมิไอเสียวัดได้ 260 °C อุณหภูมิบรรยากาศ ณ เวลานั้น 35 °C หลังจากนั้น

ทำการปรับลดปริมาณอากาศเข้าเผาไหม้และปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดอุณหภูมิไอเสีย แล้วทำการวัดใหม่ พบว่าอุณหภูมิไอเสียลดลงเท่ากับ 200 °C และปริมาณออกซิเจนส่วนเกินลดลงเหลือ 5% จงหาว่าการสูญเสียความร้อนทางปล่องลดลงคิดเป็นร้อยละเท่าใด

วิธีทำ จากภาคผนวก ก.7 ที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน 9% ที่อุณหภูมิไอเสีย 260 °C จะได้ค่าร้อยละการสูญเสียความร้อนทางปล่องคิดเป็น 14.37

หลังจากปรับปรุงแก้ไขแล้ว ใช้ภาคผนวก ก.7 ที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน 5% ที่อุณหภูมิไอเสีย 200 °C จะได้ค่าร้อยละการสูญเสียความร้อนทางปล่องคิดเป็น 7.91

ดังนั้นการสูญเสียความร้อนทางปล่องลดลงคิดเป็นร้อยละ $14.37 - 7.91 = 6.46$

7.7 การควบคุมดูแลการเผาไหม้

เนื่องจากการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเป็นการเผาไหม้ในที่จำกัด ดังนั้นการที่จะควบคุมให้การเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง และได้ความร้อนไปใช้ประโยชน์มากที่สุด จะต้องควบคุม

7.7.1 อัตราและจำนวนอากาศที่จะป้อนเข้าห้องเผาไหม้

7.7.2 การผสมอากาศและเชื้อเพลิง จะต้องมีความหนาแน่นเชื้อเพลิงเป็นฟอยละเอียด โดยใช้ความดันของอากาศ หรือ ใช้น้ำช่วยในการกระจายเป็นฝอยน้ำมัน (Atomization) อากาศที่ใช้พ่นน้ำมันในหัวฉีด เรียกว่า Primary Air ส่วนอากาศสำหรับการเผาไหม้ที่เป่าเข้าไปในเปลวไฟเรียกว่า Secondary Air ฉะนั้นการควบคุมจำนวน Primary Air และ Secondary Air จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมการเผาไหม้ โดยทั่วไปแล้วการเผาไหม้ด้วยการใช้อากาศส่วนเกินต่ำ (Low Excess Air, LEA) จะช่วยเพิ่มปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยจะช่วยประหยัดเชื้อเพลิง

7.7.3 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไประบะเตา ตามปรกติแล้วหม้อไอน้ำจะต้องทำงานในลักษณะที่มีอัตราการใช้น้ำไม่คงที่ตลอดเวลาจาก Full Rated Capacity ในลักษณะนี้หม้อไอน้ำจะมีอุปกรณ์อัตโนมัติคอยควบคุมปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงให้ได้สัดส่วนสัมพันธ์กัน นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการเร่งหรือเตาไฟตามความต้องการ โดยการเร่งไฟเมื่อใช้น้ำมาก และจะหรี่เมื่อใช้น้ำน้อยลงอีกด้วย

การควบคุมดูแลการเผาไหม้ สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ไอเสีย หรือใช้การสังเกตดูสถานะของการเผาไหม้ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 7.9 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์เป็นสิ่งจำเป็น และได้ผลแน่นอน แต่ในทางปฏิบัติแล้วอาจจะหาเครื่องมือไม่ได้ ดังนั้นการสังเกตดูเปลวไฟในห้องเผาไหม้จึงเป็นหนทางที่ช่วยให้สามารถค้นหาสถานะการเผาไหม้ที่ผิดปกติได้รวดเร็ว ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำในโครงการนี้จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ไอเสียในการตรวจวัดข้อมูลการเผาไหม้เบื้องต้น

ตารางที่ 7.9 การควบคุมปริมาณอากาศจากการสังเกตเปลวไฟและเขม่าควัน

ปริมาณอากาศที่เข้าผสมกับเชื้อเพลิง	ลักษณะเปลวไฟและความสว่างภายในห้องเผาไหม้	สีควันที่ออกจากปล่องไอเสีย
ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนพอดี	ลักษณะเปลวไฟ: เปลวไฟสั้นและมีรูปร่างคงตัว สีเปลวไฟ: เปลวสีแสดงกรณีเชื้อเพลิงเหลวและสีฟ้าปลายแสดงกรณีเชื้อเพลิงก๊าซ ความสว่างของห้องเผาไหม้: เห็นภายในห้องเผาไหม้ต่างๆ	ลักษณะ สีเทาอ่อน
ปริมาณอากาศที่เข้าเผาไหม้มากเกินไป	ลักษณะเปลวไฟ: เปลวไฟยาวและมีรูปร่างไม่คงตัว สีเปลวไฟ: เปลวสีฟ้ากรณีเชื้อเพลิงก๊าซ ความสว่างของห้องเผาไหม้: สว่างมาก	ลักษณะ สีขาวหรือไม่มีสี
ปริมาณอากาศที่เข้าเผาไหม้น้อยเกินไป	ลักษณะเปลวไฟ: เปลวไฟสั้น สีเปลวไฟ: เปลวสีแดงคล้ำปลายเปลวมีเขม่าดำ ความสว่างของห้องเผาไหม้: ภายในห้องเผาไหม้มีควันมาก	ลักษณะ สีเทาเข้มถึงดำ

7.8 ลักษณะทั่วไปของสถานที่เก็บน้ำมันเชื้อเพลิง

- 7.8.1 ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด ควรติดตั้งภายนอกอาคารในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก ในกรณีที่ติดตั้งภายในอาคารจะต้องจัดให้มีระบบระบายอากาศให้ได้อัตราการระบายอากาศไม่น้อยกว่า 10 เท่าของปริมาตรของห้องใน 1 ชั่วโมง (Air Change per Hour) สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงเบา เช่น น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซลหมุนช้าและเชื้อเพลิงหนักเช่น น้ำมันเตา การเก็บเชื้อเพลิงดังกล่าวไว้ในอาคารไม่เกิน 20,000 ลิตร
- 7.8.2 ต้องมีถนนหรือช่องทางที่สะดวกสำหรับการเข้าไปดับเพลิงหากเกิดไฟไหม้หรือเหตุฉุกเฉินอื่นใด
- 7.8.3 ความมั่นคงแข็งแรงของถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงและฐานรองรับ รวมทั้งฐานราก ควรได้รับการตรวจสอบจากวิศวกรทั้งก่อนและหลังการก่อสร้าง
- 7.8.4 ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงขนาดไม่เกิน 2,500 ลิตร สำหรับหม้อน้ำควรติดตั้งไว้เหนือพื้น หรือบนฐานสูงไม่ควรก่อกองได้ดิน ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกในการดูแล บำรุงรักษา และการได้เปรียบเชิงกลในการใช้งาน ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงขนาดเกิน 2,500 ลิตร ให้ติดตั้งฝังลงไปในพื้นที่ดิน หรือติดตั้งไว้ในห้องที่สร้างด้วยคอนกรีตและวัสดุไม่เป็นเชื้อเพลิง โดยผนังห้องทุกห้องจะต้องหนาไม่ต่ำกว่า 23 เซนติเมตร และทนไฟอย่างน้อย 2 ชั่วโมง
- 7.8.5 ต้องติดตั้งอุปกรณ์หรือระบบดับเพลิงที่เหมาะสมไว้บริเวณถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง
- 7.8.6 ต้องติดตั้งแผ่นป้ายเตือนเรื่องห้ามทำให้เกิดประกายไฟ, ห้ามสูบบุหรี่ ให้เห็นอย่างชัดเจน
- 7.8.7 ด้านใดของสถานที่เก็บน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีถนนด้านนั้นควรติดตั้งเสากันชนและทาสีให้เห็นชัดเจน

- 7.8.8 ควรติดแผ่นป้าย, สติกเกอร์ ซึ่งระบุชื่อ เบอร์โทรศัพท์ และสถานที่ตั้งของบริษัทผู้จำหน่ายน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นๆ หรือเบอร์โทรศัพท์หน่วยงานราชการที่รับแจ้งเหตุฉุกเฉินไว้ ณ บริเวณถังเก็บโดยให้เห็นได้อย่างชัดเจน
- 7.8.9 ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงที่ติดตั้งภายในอาคารควรวางห่างจากผนังที่ใกล้ที่สุดไม่น้อยกว่า 1 เมตร และควรวางห่างจากตัวอาคาร 2.50-3.00 เมตร
- 7.8.10 ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงที่ติดตั้งภายนอกอาคารจะต้องห่างจากตัวอาคารอย่างน้อย 5 เมตร และห่างจากแหล่งประกายไฟอย่างน้อย 15 เมตร

7.9 ขนาดของถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง คำแนะนำขนาดของถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง

- 7.9.1 แบบบนอน โดยทั่วไปขนาด 20,000 ลิตร (พร้อมรูปตัวอย่างประกอบในภาคผนวก ข.)
- 7.9.2 แบบตั้ง โดยทั่วไปขนาดมากกว่า 100,000 ลิตร
- 7.9.3 รถขนส่งน้ำมันมีความจุ 12,000 ลิตร, 15,000 ลิตร หรือ 30,000 ลิตร

7.10 เอกสารอ้างอิง

- 7.10.1 มาตรฐานระบบไอน้ำ, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2540
- 7.10.2 P.K. Nag, Power Plant engineering steam and nuclear, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1998.
- 7.10.3 สำเร็จ จักรใจ, การเผาไหม้, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2547
- 7.10.4 สมเกียรติ บุญชนะ, วิศวกรรมโรงจักรต้นกำลัง, สำนักพิมพ์ โรงพิมพ์พิทักษ์อักษร, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2547
- 7.10.5 คู่มือการปรับแต่งหัวเผา, เอกสารเผยแพร่ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2547
- 7.10.6 กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือการจัดการพลังงานความร้อนภายในโรงงาน, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2550
- 7.10.7 ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพเชื้อเพลิง พ.ศ. 2547 - 2548

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานอุณหภูมิไอเสียของหม้อไอน้ำ (°C)

ขนาดพิกัดหม้อไอน้ำ	เชื้อเพลิงแข็ง		เชื้อเพลิงเหลว	เชื้อเพลิงก๊าซ	ก๊าซทิ้งจากกระบวนการผลิต
	แบบตะกรับ	แบบฟลูอิดไคซ์เบด	เหลว	ก๊าซ	
หม้อไอน้ำขนาดใหญ่เพื่อผลิตไฟฟ้า	-	-	145	110	200
หม้อไอน้ำอื่นๆ					
30 ต้นต่อชั่วโมง หรือมากกว่า	200	200	200	170	200
10 ถึง 30 ต้นต่อชั่วโมง	250	200	200	170	-
5 ถึง 10 ต้นต่อชั่วโมง	-	-	220	200	-
น้อยกว่า 5 ต้นต่อชั่วโมง	-	-	250	220	-

หมายเหตุ มาตรฐานนี้ใช้ที่อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม 20°C ภาระ 100% และพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสะอาด

ตารางที่ ก.2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ

ประเภท	ชนิดเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (หน่วยเมตริก)	ค่าความร้อน (หน่วย SI)
เชื้อเพลิงแข็ง	ถ่านหินบิทูมินัส	6,297.16 kcal/kg	26,366.21 kJ/kg
	ถ่านหินลิกไนท์	2,500.24 kcal/kg	10,468.50 kJ/kg
	ชีเลื่อย	2,598.14 kcal/kg	10,878.41 kJ/kg
	แกลบ	3,438.72 kcal/kg	14,397.92 kJ/kg
	ขานอ้อย	1,798.16 kcal/kg	7,528.90 kJ/kg
	กะลาปาล์ม	4,410.00 kcal/kg	18,460.00 kJ/kg
	ไม้	3,818.41 kcal/kg	15,990.00 kJ/kg
	ถ่าน	6,900.00 kcal/kg	28,880.00 kJ/kg
	ขยะ	1,160.00 kcal/kg	4,860.00 kJ/kg
เชื้อเพลิงเหลว	น้ำมันเบนซิน	8,245.76 kcal/L	34,525.00 kJ/L
	น้ำมันดีเซล	8,697.10 kcal/L	36,414.76 kJ/L
	น้ำมันเตาเอ	9,857.66 kcal/L	41,274.02 kJ/L
	น้ำมันเตาซี	9,117.38 kcal/L	38,174.47 kJ/L
เชื้อเพลิงก๊าซ	ก๊าซธรรมชาติ	8,763.96 kcal/Nm ³	36,694.47 kJ/Nm ³
	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	11,992.53 kcal/kg	50,220 kJ/kg

ตารางที่ ก.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่างๆ

ลำดับ	ชนิด	ประเภท เชื้อเพลิง	หน่วย	ค่าความ ร้อน (MJ)
1	Agricultural waste	ของแข็ง	กิโลกรัม	12.68
2	Black liquor	ของแข็ง	กิโลกรัม	13.8
3	Fiber&Sheel	ของแข็ง	ตัน	18
4	Fuel Gas	ก๊าซ	ตัน	47.11
5	Garbage (ขยะ)	ของแข็ง	กิโลกรัม	4.86
6	Paddy husk	ของแข็ง	กิโลกรัม	14.4
7	ก๊าซธรรมชาติ ✓	ก๊าซ	ล้านบีทียู	1055
8	ก๊าซธรรมชาติจากโรงแยก(dry)	ก๊าซ	ลูกบาศก์ฟุต	1.02
9	ก๊าซธรรมชาติไปเข้าโรงแยก(wet)	ก๊าซ	ลูกบาศก์ฟุต	1.04
10	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว(LPG)	ก๊าซ	กิโลกรัม	50.23
11	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว(LPG)	ของเหลว	ลิตร	26.62
12	แกลบ	ของแข็ง	กิโลกรัม	14.4
13	ขี้เลื่อย	ของแข็ง	กิโลกรัม	10.88
14	โคก	ของแข็ง	กิโลกรัม	27.63
15	ขานอ้อย	ของแข็ง	กิโลกรัม	7.53
16	ถ่าน	ของแข็ง	กิโลกรัม	28.88
17	ถ่านดินนำเข้า	ของแข็ง	กิโลกรัม	26.37
18	น้ำมันก๊าด	ของเหลว	ลิตร	34.53
19	น้ำมันเครื่องบิน	ของเหลว	ลิตร	34.53
20	น้ำมันดีเซล	ของเหลว	ลิตร	36.42
21	น้ำมันเตา 2000 (D)	ของเหลว	ลิตร	43.45
22	น้ำมันเตา 1200 (B)	ของเหลว	ลิตร	39.52
23	น้ำมันเตา 1500 (C)	ของเหลว	ลิตร	41.28
24	น้ำมันเตา 600 (A)	ของเหลว	ลิตร	38.16
25	น้ำมันเตา	ของเหลว	ลิตร	39.77
26	บิทูบัส	ของแข็ง	กิโลกรัม	41.19
27	เบนซิน	ของเหลว	ลิตร	31.48
28	เปลือกไม้	ของแข็ง	กิโลกรัม	17
29	ฝุ่นไม้	ของแข็ง	กิโลกรัม	18
30	พลังงานไฟฟ้า	ไฟฟ้า	หน่วย(kWh)	3.6
31	โพรเพน	ก๊าซ	กิโลกรัม	47.11
32	ฟืน	ของแข็ง	กิโลกรัม	15.99
33	เมธานอล	ของเหลว	กิโลกรัม	21.51
34	ยางมะตอย	ของเหลว	ลิตร	41.19
35	ลิกไนท์ แร่คอน	ของแข็ง	กิโลกรัม	15.11
36	ลิกไนท์กระบี่	ของแข็ง	กิโลกรัม	10.88
37	ลิกไนท์แม่เมาะ	ของแข็ง	กิโลกรัม	10.47
38	ลิกไนท์สี	ของแข็ง	กิโลกรัม	18.42
39	ลิกไนท์อื่นๆ	ของแข็ง	กิโลกรัม	18.42
40	อีเทน	ก๊าซ	กิโลกรัม	46.89
41	แอนทราไซต์	ของแข็ง	กิโลกรัม	31.4
42	ไอน้ำ	ของเหลว	ตัน	1.71
43	ไอน้ำแรงดันปานกลาง	ของเหลว	ตัน	1.89
44	ไอน้ำแรงดันสูง	ของเหลว	ตัน	2.11
45	ไฮโดรเจน	ก๊าซ	ล้านบีทียู	1055

ตารางที่ ก.4 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ⁽¹⁾

หนาแน่น

หน่วยเดิม ⁽²⁾	ค่าความร้อนสูง	ค่าความร้อนต่ำ
น้ำมันเตากัมมะถันต่ำ	42.72	40.11 MJ/lit
น้ำมันเตากัมมะถันสูง	41.18	38.67 MJ/lit
น้ำมันดีเซล	38.60	36.24 MJ/lit
ก๊าซโซลีน	34.48	32.38 MJ/lit
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	26.50	23.67 MJ/lit
ก๊าซธรรมชาติ	38.45	34.33 MJ/m ³
ถ่านหิน	33.50	31.10 MJ/kg
ไฟฟ้า	3.60	3.60 MJ/kW hr

หมายเหตุ : (1) ควรตรวจสอบกับผู้จำหน่ายเชื้อเพลิง

(2) สำหรับชีวมวล แสดงในหัวข้อ 5.5

ตารางที่ ก.5 ความ

ชนิด	ความหนาแน่น
น้ำมันเตา	0.96 kg/lit
น้ำมันดีเซล	0.84 kg/lit
ก๊าซโซลีน	0.74 kg/lit
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	0.53 kg/lit
ก๊าซธรรมชาติ	0.75 kg/m ³

ตารางที่ ก.6 ค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของสารที่ใช้บ่อย

ชนิด	ค่าความร้อนจำเพาะ (c) (kJ/kg K)	ค่าความหนาแน่น (ρ) (kg/m ³)
น้ำ	4.19	1000
ไอน้ำร้อนยิ่งยวด	2.09 ⁽¹⁾	-
อากาศ	1.004 ⁽²⁾	1.293 ⁽³⁾
เหล็ก	0.477	7850
ทองแดง	0.385	8930
อะลูมิเนียม	0.9	2700
ตะกั่ว	0.128	11300
เงิน	0.235	10470
แอมโมเนีย	4.8	602

หมายเหตุ : (1) คือ ค่าเฉลี่ยของหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม ถ้าไอน้ำความดันต่ำ 1 bar มีค่าความร้อนจำเพาะ เท่ากับ 18 kJ/kg K

(2) คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ที่ 273.15 เคลวิน (K) ในขณะที่อุณหภูมิต่างๆ (T) หาได้จาก $C = a + bT + cT^2 + dT^3$ โดย $A = 28.11$, $b = 0.1967 \times 10^{-2}$, $c = 0.4802 \times 10^{-5}$, $d = -1.966 \times 10^{-9}$
เช่น 1.005(300K), 1.013(400K), 1.029(500K), 1.051(600K), 1.075(700K), 1.099(800K), 1.121(900K), 1.142(1000K) เป็นต้น

(3) คือ ความหนาแน่นของอากาศที่ 273.15 เคลวิน (K) ในขณะที่ที่อุณหภูมิต่างๆ (T) หาได้จาก

$$\frac{1.293 \times 273.15}{T}$$

T

ตารางที่ ก.7 ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกจากปล่องไอเสีย สำหรับน้ำมันเตาเกรดซี

ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย (%)	อุณหภูมิไอเสียออกจากปล่อง (°C)											
	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
2.0	5.89	6.70	7.52	8.36	9.19	10.03	10.87	11.72	12.57	13.42	14.27	15.13
2.5	6.04	6.87	7.72	8.57	9.43	10.29	11.16	12.02	12.89	13.77	14.65	15.53
3.0	6.20	7.06	7.93	8.80	9.68	10.57	11.46	12.35	13.24	14.14	15.04	15.95
3.5	6.37	7.25	8.15	9.05	9.95	10.86	11.77	12.69	13.61	14.53	15.46	16.39
4.0	6.55	7.46	8.38	9.31	10.24	11.17	12.11	13.05	14.00	14.94	15.90	16.86
4.5	6.75	7.68	8.63	9.58	10.54	11.50	12.46	13.43	14.41	15.38	16.37	17.35
5.0	6.95	7.91	8.89	9.87	10.86	11.85	12.84	13.84	14.84	15.85	16.86	17.88
5.5	7.17	8.16	9.17	10.18	11.20	12.22	13.24	14.27	15.31	16.35	17.39	18.44
6.0	7.40	8.42	9.46	10.51	11.56	12.62	13.67	14.74	15.81	16.88	17.95	19.04
6.5	7.65	8.71	9.78	10.86	11.95	13.04	14.13	15.23	16.34	17.44	18.56	19.67
7.0	7.92	9.00	10.12	11.24	12.36	13.49	14.63	15.76	16.90	18.05	19.20	20.36
7.5	8.20	9.33	10.49	11.56	12.81	13.98	15.15	16.33	17.52	18.70	19.90	21.09
8.0	8.51	9.68	10.88	12.08	13.29	14.50	15.72	16.95	18.17	19.41	20.64	21.89
8.5	8.84	10.06	11.31	12.56	13.81	15.07	16.34	17.61	18.88	20.16	21.45	22.74
9.0	9.20	10.47	11.77	13.07	14.37	15.69	17.00	18.32	19.65	20.99	22.32	23.67
9.5	9.60	10.92	12.27	13.62	14.99	16.35	17.73	19.10	20.49	21.88	23.27	24.68
10.0	10.02	11.41	12.82	14.23	15.65	17.08	18.52	19.96	21.40	22.85	24.31	25.77
10.5	10.49	11.94	13.41	14.90	16.38	17.88	19.38	20.89	22.40	23.92	25.45	26.98
11.0	11.01	12.52	14.07	15.63	17.19	18.76	20.33	21.91	23.50	25.09	26.69	28.30
11.5	11.57	13.17	14.80	16.43	18.08	19.73	21.38	23.04	24.71	26.39	28.07	29.76
12.0	12.21	13.89	15.61	17.33	19.06	20.80	22.55	24.30	26.06	27.83	29.61	31.39
12.5	12.91	14.69	16.51	18.34	20.17	22.01	23.85	25.71	27.57	29.44	31.32	33.21
13.0	13.71	15.60	17.53	19.46	21.41	23.36	25.32	27.29	29.27	31.26	33.25	35.25
13.5	14.61	16.62	18.68	20.74	22.82	24.90	26.99	29.09	31.19	33.31	35.43	37.57
14.0	15.64	17.80	20.00	22.20	24.42	26.65	28.89	31.14	33.39	35.66	37.93	40.22
14.5	16.83	19.15	21.51	23.89	26.28	28.68	31.08	33.50	35.93	38.37	40.81	43.27
15.0	18.21	20.72	23.29	25.86	28.44	31.04	33.64	36.26	38.89	41.53	44.17	46.83

หมายเหตุ วิเคราะห์โดยสมการของ Rosin ที่อุณหภูมิ 35 °C และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 9,117.38 kcal/kg (38,174.47 kJ/kg)

ตารางที่ ก.8 ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องไอเสีย สำหรับน้ำมันเตาซี (ต่อ)

ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย (%)	อุณหภูมิไอเสียออกจากปล่อง (°C)												
	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	1,000	1,100	1,200
2.0	17.33	19.55	21.80	24.09	26.40	28.74	31.11	33.51	35.70	37.89	42.27	46.65	51.03
2.5	17.78	20.06	22.37	24.72	27.09	29.49	31.92	34.38	36.63	38.88	43.37	47.86	52.36
3.0	18.26	20.60	22.98	25.38	27.82	30.28	32.78	35.31	37.61	39.92	44.54	49.15	53.77
3.5	18.76	21.17	23.61	26.08	28.58	31.12	33.68	36.28	38.65	41.03	45.77	50.51	55.25
4.0	19.30	21.78	24.28	26.83	29.40	32.01	34.65	37.32	39.76	42.19	47.07	51.95	56.83
4.5	19.87	22.41	25.00	27.61	30.26	32.95	35.66	38.41	40.92	43.44	48.46	53.48	58.50
5.0	20.47	23.10	25.76	28.45	31.18	33.95	36.75	39.58	42.17	44.75	49.93	55.10	60.27
5.5	21.11	23.82	26.56	29.34	32.16	35.01	37.90	40.82	43.49	46.16	51.49	56.83	62.16
6.0	21.80	24.59	27.43	30.30	33.20	36.15	39.13	42.14	44.90	47.65	53.16	58.67	64.18
6.5	22.53	25.42	28.35	31.31	34.32	37.36	40.44	43.56	46.41	49.25	54.95	60.64	66.33
7.0	23.31	26.3	29.33	32.40	35.51	38.66	41.85	45.07	48.02	50.97	56.86	62.75	68.64
7.5	24.15	27.25	30.39	33.57	36.79	40.06	43.36	46.70	49.76	52.81	58.91	65.02	71.12
8.0	25.06	28.28	31.53	34.83	38.18	41.56	44.99	48.46	51.62	54.79	61.12	67.46	-
8.5	26.04	29.38	32.77	36.19	39.67	43.18	46.75	50.35	53.64	56.93	63.51	70.09	-
9.0	27.10	30.58	34.10	37.67	41.28	44.94	48.65	52.40	55.83	59.25	66.10	72.95	-
9.5	28.25	31.88	35.55	39.27	43.04	46.86	50.72	54.63	58.20	61.77	68.91	-	-
10.0	29.51	33.30	37.14	41.02	44.96	48.94	52.98	57.06	60.79	64.52	71.98	-	-
10.5	30.89	34.85	38.87	42.94	47.06	51.23	55.45	59.73	63.63	67.54	-	-	-
11.0	32.41	36.56	40.77	45.04	49.37	53.74	58.17	62.66	66.75	70.85	-	-	-
11.5	34.08	38.45	42.88	47.37	51.92	56.52	61.18	65.90	70.21	-	-	-	-
12.0	35.94	40.55	45.23	49.96	54.75	59.61	64.52	69.50	-	-	-	-	-
12.5	38.02	42.90	47.84	52.85	57.92	63.06	68.26	73.52	-	-	-	-	-
13.0	40.36	45.54	50.79	56.10	61.49	66.94	72.46	-	-	-	-	-	-
13.5	43.01	48.53	54.13	59.79	65.53	71.34	-	-	-	-	-	-	-
14.0	46.05	51.95	57.94	64.00	70.15	-	-	-	-	-	-	-	-
14.5	49.54	55.90	62.34	68.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.0	53.62	60.51	67.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.5	58.45	65.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16.0	64.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ วิเคราะห์โดยสมการของ Rosin ที่อุณหภูมิแวดล้อม 35 °C และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 9,117.38 kcal/L (38,174.47 kJ/L)

ตารางที่ ก.9 ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องไอเสีย สำหรับถ่านหินบิทูมินัส

ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย (%)	อุณหภูมิไอเสียออกจากปล่อง (°C)											
	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
4.0	6.78	7.71	8.67	9.63	10.59	11.55	12.52	13.50	14.48	15.46	16.44	17.43
4.5	6.98	7.94	8.92	9.90	10.89	11.89	12.89	13.89	14.89	15.91	16.92	17.94
5.0	7.18	8.18	9.19	10.20	11.22	12.24	13.27	14.30	15.34	16.38	17.43	18.47
5.5	7.41	8.43	9.47	10.52	11.57	12.62	13.68	14.75	15.81	16.89	17.96	19.05
6.0	7.64	8.70	9.77	10.85	11.94	13.03	14.12	15.22	16.32	17.43	18.54	19.65
6.5	7.90	8.99	10.10	11.21	12.33	13.46	14.59	15.72	16.86	18.00	19.15	20.31
7.0	8.17	9.29	10.44	11.60	12.76	13.92	15.09	16.26	17.44	18.62	19.81	21.00
7.5	8.46	9.63	10.82	12.01	13.21	14.42	15.63	16.84	18.06	19.29	20.52	21.75
8.0	8.77	9.98	11.22	12.46	13.70	14.95	16.21	17.47	18.73	20.00	21.28	22.56
8.5	9.11	10.37	11.65	12.94	14.23	15.53	16.83	18.14	19.46	20.77	22.10	23.43
9.0	9.48	10.79	12.12	13.46	14.80	16.15	17.51	18.87	20.24	21.61	22.99	24.37
9.5	9.88	11.24	12.63	14.03	15.43	16.83	18.25	19.67	21.09	22.52	23.96	25.40
10.0	10.31	11.74	13.19	14.64	16.11	17.58	19.05	20.53	22.02	23.51	25.01	26.52
10.5	10.79	12.28	13.80	15.32	16.85	18.39	19.93	21.48	23.04	24.60	26.17	27.75
11.0	11.31	12.87	14.47	16.06	17.67	19.28	20.90	22.53	24.16	25.80	27.44	29.09
11.5	11.89	13.53	15.21	16.89	18.58	20.27	21.97	23.68	25.40	27.12	28.85	30.59
12.0	12.54	14.27	16.03	17.80	19.58	21.37	23.16	24.96	26.77	28.59	30.41	32.24
12.5	13.26	15.09	16.95	18.82	20.70	22.59	24.49	26.39	28.31	30.23	32.16	34.09
13.0	14.07	16.01	17.99	19.97	21.97	23.97	25.99	28.01	30.04	32.07	34.12	36.17
13.5	14.98	17.05	19.16	21.28	23.40	25.54	27.68	29.83	32.00	34.17	36.35	38.53
14.0	16.03	18.25	20.50	22.77	25.04	27.33	29.62	31.92	34.24	36.56	38.89	41.23
14.5	17.24	19.63	22.05	24.48	26.93	29.39	31.85	34.33	36.82	39.32	41.83	44.34
15.0	18.66	21.23	23.85	26.49	29.14	31.79	34.46	37.14	39.83	42.54	45.25	47.97

หมายเหตุ: วัเคราะห์โดยสมการของ Rosin ที่อุณหภูมิ 35 °C และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 6,297.16 kcal/kg (26,366.21 kJ/kg)

ตารางที่ ก.10 ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องไอเสีย สำหรับถ่านหินบิทูมินัส (ต่อ)

ปริมาณออกซิเจนใน ไอเสีย (%)	อุณหภูมิไอเสียออกจากปล่อง (°C)												
	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	1,000	1,100	1,200
4.0	19.96	22.52	25.12	27.75	30.41	33.10	35.83	38.60	41.12	43.64	48.69	53.73	58.78
4.5	20.54	23.18	25.85	28.55	31.29	34.06	36.87	39.72	42.31	44.90	50.10	55.29	60.48
5.0	21.15	23.87	26.62	29.40	32.22	35.08	37.97	40.90	43.58	46.25	51.60	56.94	62.29
5.5	21.18	24.61	27.44	30.31	33.22	36.17	39.15	42.17	44.92	47.68	53.19	58.70	64.21
6.0	22.50	25.39	28.32	31.28	34.28	37.32	40.40	43.52	46.36	49.20	54.89	60.58	66.27
6.5	23.25	26.23	29.26	32.32	35.42	38.56	41.74	44.96	47.89	50.83	56.71	62.59	68.46
7.0	24.05	27.13	30.26	33.43	36.64	39.88	43.17	46.50	49.54	52.58	58.66	64.74	70.81
7.5	24.91	28.10	31.34	34.62	37.94	41.31	44.71	48.16	51.31	54.45	60.75	67.05	73.34
8.0	25.83	29.14	32.50	35.90	39.35	42.84	46.37	49.95	53.21	56.48	63.00	69.53	76.06
8.5	26.83	30.27	33.76	37.29	40.87	44.49	48.16	51.87	55.27	58.66	65.44	-	-
9.0	27.91	31.49	35.12	38.79	42.52	46.29	50.10	53.96	57.49	61.02	68.07	-	-
9.5	29.08	32.82	36.60	40.43	44.31	48.23	52.21	56.24	59.91	63.59	70.94	-	-
10.0	30.37	34.26	38.21	42.21	46.26	50.36	54.51	58.71	62.55	66.39	-	-	-
10.5	31.77	35.85	39.98	44.16	48.40	52.69	57.03	61.43	65.44	69.46	-	-	-
11.0	33.31	37.59	41.92	46.31	50.75	55.25	59.80	64.41	68.62	72.83	-	-	-
11.5	35.02	39.51	44.07	48.68	53.35	58.08	62.87	67.71	72.14	-	-	-	-
12.0	36.92	41.65	46.45	51.31	56.24	61.22	66.27	71.38	-	-	-	-	-
12.5	39.04	44.04	49.12	54.26	59.47	64.74	70.08	-	-	-	-	-	-
13.0	41.42	46.73	53.12	57.57	63.10	68.69	-	-	-	-	-	-	-
13.5	44.12	49.78	55.52	61.33	67.21	-	-	-	-	-	-	-	-
14.0	47.21	53.27	59.41	65.62	71.92	-	-	-	-	-	-	-	-
14.5	50.77	57.29	63.89	70.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.0	54.93	61.98	69.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ วิเคราะห์โดยสมการของ Rosin ที่อุณหภูมิ 0°C และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 6,297.16 kcal/kg

ตารางที่ ก.11 ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องไอเสีย สำหรับก๊าซธรรมชาติ

ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย (%)	อุณหภูมิไอเสียออกจากปล่อง (°C)											
	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
0.5	5.75	6.54	7.35	8.16	8.98	9.80	10.62	11.45	12.28	13.11	13.95	14.79
1.0	5.88	6.69	7.52	8.35	9.18	10.02	10.86	11.71	12.56	13.41	14.26	15.12
1.5	6.02	6.85	7.69	8.54	9.40	10.26	11.12	11.98	12.85	13.72	14.6	15.48
2.0	6.16	7.01	7.88	8.75	9.62	10.50	11.38	12.27	13.16	14.05	14.95	15.85
2.5	6.32	7.19	8.08	8.97	9.86	10.76	11.67	12.57	13.48	14.4	15.32	16.24
3.0	6.48	7.37	8.28	9.20	10.11	11.04	11.96	12.89	13.83	14.77	15.71	16.65
3.5	6.65	7.56	8.50	9.44	10.38	11.33	12.28	13.23	14.19	15.16	16.12	17.09
4.0	6.83	7.77	8.73	9.69	10.66	11.64	12.61	13.59	14.58	15.57	16.56	17.56
4.5	7.02	7.99	8.97	9.97	10.96	11.96	12.97	13.97	14.99	16.00	17.02	18.05
5.0	7.22	8.22	9.23	10.25	11.28	12.31	13.34	14.38	15.42	16.47	17.52	18.57
5.5	7.44	8.46	9.51	10.56	11.62	12.68	13.74	14.81	15.88	16.96	18.04	19.13
6.0	7.67	8.73	9.81	10.89	11.98	13.07	14.17	15.27	16.37	17.49	18.60	19.72
6.5	7.92	9.01	10.12	11.24	12.36	13.49	14.62	15.76	16.90	18.05	19.20	20.36
7.0	8.18	9.31	10.46	11.61	12.77	13.94	15.11	16.29	17.47	18.65	19.84	21.03
7.5	8.46	9.63	10.82	12.02	13.22	14.42	15.63	16.85	18.07	19.30	20.53	21.76
8.0	8.77	9.98	11.21	12.45	13.70	14.95	16.20	17.46	18.72	19.99	21.27	22.55
8.5	9.10	10.35	11.63	12.92	14.21	15.51	16.81	18.12	19.43	20.75	22.07	23.40
9.0	9.46	10.76	12.09	13.43	14.77	16.12	17.47	18.83	20.19	21.56	22.94	24.32
9.5	9.85	11.20	12.59	13.98	15.38	16.78	18.19	19.60	21.02	22.45	23.88	25.32
10.0	10.27	11.69	13.13	14.58	16.04	17.50	18.97	20.45	21.93	23.42	24.91	26.41
10.5	10.73	12.22	13.73	15.24	16.76	18.29	19.83	21.37	22.92	24.48	26.04	27.60
11.0	11.25	12.80	14.38	15.97	17.56	19.17	20.77	22.39	24.01	25.64	27.28	28.92
11.5	11.81	13.44	15.10	16.77	18.44	20.13	21.82	23.51	25.22	26.93	28.65	30.37
12.0	12.44	14.15	15.90	17.66	19.42	21.20	22.98	24.76	26.56	28.36	30.17	31.98

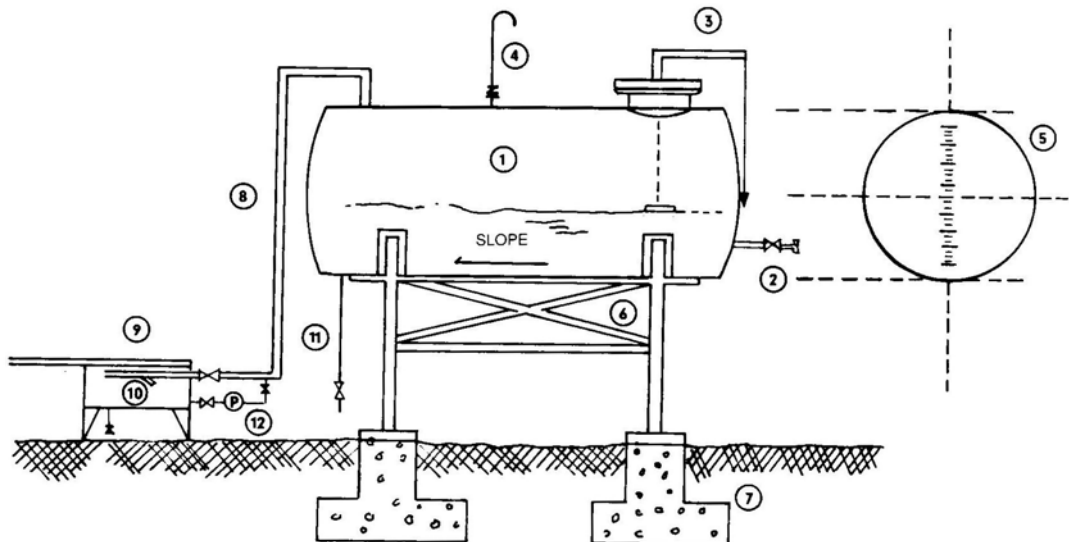
หมายเหตุ วิเคราะห์โดยสมการของ Rosin ที่อุณหภูมิ 35 °C และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 8,763.96 kcal/Nm³ (36,694.70 kJ/Nm³)

ตารางที่ ก.12 ร้อยละการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องไอเสีย สำหรับก๊าซธรรมชาติ (ต่อ)

ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย (%)	อุณหภูมิไอเสียออกจากปล่อง (°C)												
	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	1,000	1,100	1,200
0.5	16.93	19.10	21.30	23.53	25.79	28.08	30.39	32.73	34.87	37.01	41.29	45.57	49.85
1.0	17.31	19.54	21.79	24.07	26.38	28.72	31.08	33.48	35.67	37.86	42.23	46.61	50.99
1.5	17.72	19.99	22.3	24.63	27.00	29.39	31.81	34.26	36.5	38.74	43.22	47.70	52.18
2.0	18.15	20.47	22.83	25.22	27.64	30.09	32.58	35.09	37.38	39.67	44.26	48.85	53.43
2.5	18.60	20.98	23.40	25.85	28.33	30.84	33.38	35.96	38.31	40.66	45.36	50.06	54.76
3.0	19.07	21.52	24.00	26.51	29.05	31.63	34.23	36.87	39.28	41.69	46.51	51.33	56.15
3.5	19.57	22.08	24.63	27.20	29.81	32.46	35.13	37.84	40.32	42.79	47.74	52.68	57.63
4.0	20.10	22.68	25.30	27.94	30.62	33.34	36.09	38.87	41.41	43.95	49.03	54.11	59.19
4.5	20.67	23.32	26.00	28.73	31.48	34.27	37.10	39.96	42.57	45.18	50.41	55.63	60.85
5.0	21.26	23.99	26.76	29.56	32.39	35.26	38.17	41.12	43.80	46.49	51.87	57.24	62.61
5.5	21.90	24.71	27.56	30.44	33.36	36.32	39.32	42.35	45.12	47.88	53.42	58.95	64.49
6.0	22.58	25.48	28.41	31.39	34.40	37.45	40.54	43.66	46.52	49.37	55.08	60.78	66.49
6.5	23.31	26.30	29.33	32.40	35.50	38.65	41.84	45.07	48.01	50.96	56.85	62.74	68.63
7.0	24.08	27.18	30.31	33.48	36.69	39.94	43.24	46.57	49.61	52.66	58.75	64.83	70.92
7.5	24.92	28.12	31.36	34.64	37.96	41.33	44.74	48.19	51.34	54.49	60.78	67.08	-
8.0	25.82	29.13	32.49	35.89	39.33	42.82	46.35	49.93	53.19	56.45	62.98	69.51	-
8.5	26.79	30.23	33.71	37.24	40.82	44.43	48.10	51.81	55.19	58.58	65.35	-	-
9.0	27.85	31.42	35.04	38.71	42.42	46.18	49.99	53.84	57.36	60.88	67.92	-	-
9.5	28.99	32.71	36.48	40.30	44.16	48.08	52.04	56.06	59.72	63.38	70.71	-	-
10.0	30.24	34.12	38.05	42.03	46.07	50.15	54.29	58.47	62.29	66.11	-	-	-
10.5	31.61	35.66	39.77	43.93	48.15	52.42	56.74	61.12	65.11	69.10	-	-	-
11.0	33.11	37.36	41.67	46.03	50.44	54.91	59.44	64.03	68.21	72.39	-	-	-
11.5	34.77	39.24	43.76	48.34	52.97	57.67	62.43	67.24	71.64	-	-	-	-
12.0	36.62	41.32	46.08	50.91	55.79	60.74	65.74	70.81	-	-	-	-	-
12.5	38.69	43.65	48.68	53.78	58.94	64.16	69.45	-	-	-	-	-	-
13.0	41.01	46.27	51.60	57.00	62.47	68.01	-	-	-	-	-	-	-
13.5	43.64	49.24	54.92	60.66	66.49	-	-	-	-	-	-	-	-
14.0	46.65	52.64	58.70	64.85	71.07	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยสมการของ Rosin ที่อุณหภูมิแวดล้อม 35 °C และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 8,763.96 kcal/Nm³ (36,694.70 kJ/Nm³)

ข.1 ตัวอย่างการติดตั้งถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง ถังนอน



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างการเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงแบบนอน

หมายเลข	รายการ	หมายเหตุ
1	ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงแบบนอนเหนือพื้นดิน	
2	ท่อส่งน้ำมันพร้อมวาล์ว	- น้ำมันเตา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางควรเป็น 80 มิลลิเมตร
3	กลไกของมาตรวัด (ลูกลอย+ลูกตั้ง)	
4	ท่อระบายไอน้ำมัน	- เส้นผ่าศูนย์กลางท่อควรเป็น 40 มิลลิเมตร
5	มาตรตัวเลขบอกปริมาณ	
6	ฐานเหล็ก (ฐานปูน)	- วิศวกรคำนวณ
7	เข็ม / ฐานแผ่	- วิศวกรคำนวณ
8	ท่อรับน้ำมันเชื้อเพลิง	- เส้นผ่าศูนย์กลางควรเป็น 80 มิลลิเมตร
9	หัวท่อเดิมน้ำมัน	- รายละเอียดแบบรูปที่ 3
10	ถังรับน้ำมันล้น (SUMP)	- ขนาด = 1,000 x 1,000 x 500 มิลลิเมตร
11	ท่อระบาย	- เส้นผ่าศูนย์กลางควรเป็น 40 มิลลิเมตร
12	ปั๊มเฟือง	- สำหรับน้ำมันล้นเข้าถัง

ภาคผนวก ค

เรื่องกำหนดคุณภาพของเชื้อเพลิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน (พ.ศ. 2547-2548) ได้แก่
น้ำมันเตา ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล เอทานอลแปลงสภาพ น้ำมันเบนซินพื้นฐาน และไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ค.1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเตา (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2547

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันเตา					วิธีทดสอบ
			ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5	
1	ปริมาณกำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur Content, %wt.)	ไม่สูงกว่า	2.0	2.0	2.0	2.0	0.5	ASTM D 4294
2	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 °C (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่สูงกว่า	0.985	0.990	0.995	0.995	0.995	ASTM D 1298
3	ความหนืด (Viscosity, cSt) ณ อุณหภูมิ 50 °C เซนติสโตกส์ ณ อุณหภูมิ 100 °C เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	7 80 - -	81 180 - -	181 230 - -	231 280 - -	- - 3 30	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ °C (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	60	60	60	60	60	ASTM D 93

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันเตา					วิธีทดสอบ
			ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5	
5	จุดไหลเท °C (Pour Point , °C)	ไม่สูงกว่า	24	24	30	30	57	ASTM D 97
6	ปริมาณความร้อน แคลอรี/กรัม (Gross Heat of Combustion, Cal/g)	ไม่ต่ำกว่า	10,000	9,900	9,900	9,900	9,900	ASTM D 240
7	เถ้า ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash Content, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	ASTM D 482
8	น้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร (Water and Sediment, %vol.)	ไม่สูงกว่า	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	ASTM D 1796
9	สี (Colour)	ไม่ต่ำกว่า	8.0	-	-	-	-	ASTM D 1500

หมายเหตุ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ก.2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของก๊าซปิโตรเลียมเหลว พ.ศ. 2547

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	ความดันไอ ณ อุณหภูมิ 37.8 °C กิโลปาสกาล (Vapour Pressure @ 37.8 °C kPA)	ไม่สูงต่ำ	1,380	ASTM D 1267
2	การกลั่น °C (Distillation, °C) อุณหภูมิของจุดเดือด เมื่อก๊าซปิโตรเลียมเหลวระเหย ไปในอัตราส่วนร้อยละ 95 โดยปริมาตร (95% Evaporated)	ไม่สูงกว่า	2.2	ASTM D 1837
3	ปริมาณเพนเทนและสารอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า เพนเทนต่อก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยปริมาตร ร้อยละโดยปริมาตร (Pentane and Composition Content, %vol.)	ไม่สูงกว่า	2.0	ASTM D 2163
4	การกัดกร่อน (Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 1838
5	ปริมาณกำมะถัน ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก (Sulphur Content, ppm by wt.)	ไม่สูงกว่า	140	ASTM D 2784
6	ปริมาณกากหลังการระเหยของก๊าซปิโตรเลียมเหลว 100 มล. มิลลิลิตร (Residue, ml)	ไม่สูงกว่า	0.05	ASTM D 2158
7	ปริมาณน้ำ (Water Content)		ไม่มี	ตรวจพินิจด้วยสายตา
8	สารที่ให้กลิ่นซึ่งไวต่อความรู้สึก (Odorant)		มี	ตรวจพินิจด้วยสายตา
หมายเหตุ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้				

ค.3 กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันก๊าด พ.ศ. 2547

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
1	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 °C (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่สูงกว่า	0.84	ASTM D 1298
2	จุดให้ควัน มิลลิเมตร (Smoke Point, mm.)	ไม่ต่ำกว่า	22	ASTM D 1322
3	จุดวาบไฟ °C (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	38	ASTM D 56
4	ปริมาณกำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur Content, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	ASTM D 4294
5	การกัดกร่อน (Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
6	การกลั่น °C (Distillation, °C) (1) อุณหภูมิการระเหยในอัตราร้อยละ 10 โดยปริมาตร (10% Evaporated) (2) จุดเดือดสุดท้าย (End Point)	ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	205 300	ASTM D 86
7	สี (Saybolt Colour)	ไม่ต่ำกว่า	+16	ASTM D 156

หมายเหตุ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มิชข้อได้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ก.4 กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2548

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ
			หมุนเร็ว		หมุนช้า	
			ธรรมดา	ปี 5		
1	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่ต่ำกว่า	0.81	0.81	-	ASTM D 1298
		และ				
		ไม่สูงกว่า	0.87	0.87	0.920	ASTM D 613
2	จำนวนซีเทน (Cetane Number) หรือ	ไม่ต่ำกว่า	47	47	45	ASTM D 976
	ดัชนีซีเทน (Calculated Cetane Index)					ASTM D 445
3	ความหนืด (Viscosity, cSt)					
	3.1 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (at 40 °C)	ไม่ต่ำกว่า	1.8	1.8	-	
		และ				
		ไม่สูงกว่า	4.1	4.1	8.0	
	หรือ					
	3.2 ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (at 50 °C)	ไม่สูงกว่า	-	-	6.0	
4	จุดไหลเท องศาเซลเซียส (Pour Point , °C)	ไม่สูงกว่า	10	10	16	ASTM D 976

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ
			หมุนเร็ว		หมุนช้า	
			ธรรมดา	ปี 5		
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.035	0.035	1.5	ASTM D 4294
6	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	หมายเลข 1	-	ASTM D 130
7	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กรัม/ลูกบาศก์เมตร (Oxidation Stability, g/m ³)	ไม่สูงกว่า	-	25	-	ASTM D 2274
8	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Carbon Residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	-	ASTM D 189
9	น้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร (Water and Sediment, %vol.)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	0.3	ASTM D 2709
10	เถ้า ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.01	0.01	0.02	ASTM D 482
11	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่สูงกว่า	52	52	52	ASTM D 93
12	การกลั่น องศาเซลเซียส (Distillation, °C)					
	อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละเก้าสิบ (90% recovered)	ไม่สูงกว่า	357	357	-	ASTM D 86

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ
			หมุนเร็ว		หมุนช้า	
			ธรรมดา	ปี 5		
13	สี (Colour) 12.1 ชนิดของสี (Hue) 12.2 เนื้อสี มิลลิกรัม/ลิตร (Dye, mg/l)	ไม่ต่ำกว่า		น้ำเงิน 7.0		(1)เปรียบเทียบสีและปริมาณเนื้อสีกับน้ำมันมาตรฐานที่เตรียมขึ้นใหม่ โดยใช้สีละลายในน้ำมันก่อนการย้อมสีให้มีปริมาณเท่ากับที่กำหนด แล้วนำมาบรรจุแยกกันในภาชนะที่ใช้ในการวัดสีตามวิธีทดสอบ ASTM D 1500 แล้ว ตรวจพินิจด้วยสายตาหรือ (2)ASTMD 2392

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ
			หมุนเร็ว		หมุนช้า	
			ธรรมดา	ปี 5		
14	12.3 ความเข้มของสี (Intensity) ไบโอดีเซลประเภททิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละโดยปริมาตร (Methyl Ester of Fatty Acid, %vol.)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	- 4.0	 4	4.5 7.5	ASTM D 1500 EN 14078
15	คุณสมบัติการหล่อลื่น ไมโครเมตร (Lubricity, um)	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	460	460	-	CEC F-06-A-96
16	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน				

- หมายเหตุ 1) วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียด
แนบท้ายนี้
- 2) ใช้สารประกอบประเภท 1,4 dialkylamino anthraquinone และใช้วิธีทดสอบตาม (1) และ (2)

ก.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของเอทานอลแปลงสภาพ พ.ศ. 2548

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
1	ปริมาณเอทานอลและแอลกอฮอล์ชนิดอื่นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมสูงกว่าเอทานอล ร้อยละ โดยปริมาตร (Ethanol plus higher saturated alcohols, %vol.)	ไม่ต่ำกว่า	99.0	EN 2870 Appendix 2 Method B
2	โมโนแอลกอฮอล์ชนิดอื่นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 3-5 อะตอม ร้อยละ โดยปริมาตร (Higher saturated (C3-C5) mono alcohols, %vol.)	ไม่สูงกว่า	2.0	EN 2870 Method III
3	เมทานอล ร้อยละ โดยปริมาตร (Methanol, %vol.)	ไม่สูงกว่า	0.5	EN 2870 Method III
4	ยางเหนียว มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร (Solvent Washed Gum, mg/100mL)	ไม่สูงกว่า	5.0	ASTM D 381
5	น้ำ ร้อยละ โดยปริมาตร (Water, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.3	ASTM D 203
6	คลอไรด์อนินทรีย์ มิลลิกรัม/ลิตร (Inorganic chloride, mg/L)	ไม่สูงกว่า	20	ASTM D 512
7	ทองแดง มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Copper, mg/kg)	ไม่สูงกว่า	0.07	ASTM D 1688
8	ความเป็นกรดคำนวณเป็นกรดอะซิติก มิลลิกรัม/ลิตร (Acidity as acetic acid, mg/kg)	ไม่สูงกว่า	30	ASTM D 1613

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
9	ความเป็นกรด-ด่าง (pHe)	ไม่ต่ำกว่า	6.5	ASTM D 6423
10	สภาพตัวนำไฟฟ้า ไมโครซีเมนส์/เมตร (Electrical conductivity US/m)	และ ไม่สูงกว่า	9.0	ASTM D 1125
11	ลักษณะที่ปรากฏ	ไม่สูงกว่า	500	
12	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		เป็นของเหลวใสไม่ข้น ไม่แยกชั้น และไม่มี สารแขวนลอย ตรวจพินิจด้วยสายตา

หมายเหตุ 1) วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ก.6 กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเบนซินพื้นฐาน พ.ศ. 2548

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันเบนซินพื้นฐาน		วิธีทดสอบ
			ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	
1	ค่าออกเทน 1.1 โดยวิธีวิจัย (Research Octane Number ; RON - ผู้ผลิตจำหน่าย ณ จุดส่งมอบ 1.2 โดยวิธีมอเตอร์ (Motor Octane Number ; MON - ผู้ผลิตจำหน่าย ณ จุดส่งมอบ 1.3 ข้อกำหนดเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าออกเทน นอกจากอัตราค่าออกเทนของน้ำมันเบนซินพื้นฐานจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในส่วนที่เกี่ยวกับค่าออกเทนของน้ำมันแก๊สโซฮอล์แล้ว ขบวนการและขั้นตอนการผลิตน้ำมันเบนซินพื้นฐานยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในส่วนที่เกี่ยวข้องกับค่าออกเทนของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ด้วย จึงกำหนดให้เป็นหน้าที่ของผู้ค้าน้ำมันที่เป็นผู้ผลิตน้ำมันเบนซินพื้นฐานที่จะนำไปใช้ผลิตน้ำมันแก๊สโซฮอล์ต้องทำการทดสอบว่าค่าออกเทนของน้ำมันเบนซินพื้นฐานที่ผลิตนั้น จะต้องมียค่าออกเทนเท่าใด (ที่ไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ) เมื่อนำไปผสมกับเอทานอลตามมาตรฐานที่กำหนด จะมีผลทำให้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ผลิตได้มีค่าออกเทนตามที่กำหนด โดยให้	ไม่ต่ำกว่า ไม่ต่ำกว่า	87 76	89 78	ASTM D 2699 ASTM D 2700

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันเบนซินพื้นฐาน		วิธีทดสอบ
			ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	
9	(2) การระเหยในอัตราร้อยละ 50 โดยปริมาตร (50% Evaporated)	ไม่ต่ำกว่า และ	90	90	ASTM D 4953
	(3) การระเหยในอัตราร้อยละ 90 โดยปริมาตร (90% Evaporated)	ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	110 170	110 170	
	(4) จุดเดือดสุดท้าย (End Point)	ไม่สูงกว่า	200	200	
	8.2 กากน้ำมัน ร้อยละโดยปริมาตร (Residue, % vol.)	ไม่สูงกว่า	2.0	2.0	
	ความดันไอ ณ อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส กิโลปาสกาล (Vapour Pressure @ 37.8 °C, kPa)	ไม่สูงกว่า	54.5	54.5	
	เบนซีน ร้อยละโดยปริมาตร (Benzene, % vol.)	ไม่สูงกว่า	3.8	3.8	
10	สารอะโรมาติก ร้อยละโดยปริมาตร (Aromatic, % vol.)	ไม่สูงกว่า	38	46	ASTM D 5580
11	ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2551 เป็นต้นไป	ไม่สูงกว่า	38	38	(1)เปรียบเทียบสี และ ปริมาณเนื้อสีกับน้ำมัน มาตรฐาน ที่เตรียมขึ้น
12	สี (Colour)				
	12.1 ชนิดของสี		เขียว	ส้ม	

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันเบนซินพื้นฐาน		วิธีทดสอบ
			ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	
13	(Hue) 12.2 เนื้อสี มิลลิกรัม/ลิตร (Dye, mg/L)	ไม่ต่ำกว่า	4.0	10.0	ใหม่ โดยใช้สีละลายใน น้ำมันก่อนการเชื่อมสีให้ มีปริมาณเท่ากับที่ กำหนด แล้วนำมา บรรจุแยกกันในภาชนะ ที่ใช้ในการวัดสีตามวิธี ทดสอบ ASTM D 1500 แล้วตรวจพินิจด้วย สายตา หรือ (2) ASTM D 2392 ASTM D 203
	น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.7	0.7	
	ลักษณะทั่วไปที่ปรากฏ (Appearance)		เป็นของเหลวใส ไม่ขุ่น ไม่แยกชั้น และไม่มีสารแขวนลอย		
	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ

1) วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มิข้อได้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

- 2) ทดสอบเฉพาะกรณีที่เคยมีสารเติมแต่ง (Additive) ที่มีธาตุฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ
- 3) ใช้น้ำมันเบนซินที่มีความเข้มข้นของสีตามมาตรฐาน ASTM D 1500 ไม่สูงกว่า 0.5 ผสมกับสารประกอบประเภท 1,4 -dialkylamino anthraquinone และ 1,3 benzenediol, 2,4-bis (alkylphenyl)azo ในอัตราส่วน 9 : 4 โดยน้ำหนัก หรือใช้อัตราส่วนแตกต่างจากสีที่กำหนดก็ได้ แต่ต้องมีความเข้มข้นของสีเทียบเท่าสีเขียวมาตรฐานที่กำหนดไว้ข้างต้น และใช้วิธีทดสอบตาม (1) หรือ (2)
- 4) ใช้น้ำมันเบนซินที่มีความเข้มข้นของสีตามมาตรฐาน ASTM D 1500 ไม่สูงกว่า 0.5 ผสมกับสารประกอบประเภท 2-naphthalenol (Phenylaze) phenyl azo alkyl derivatives และ 1,3-benzenediol, 2,4-bis (alkylphenyl) azo- ในอัตราส่วน 1 : 3 โดยน้ำหนัก หรือใช้อัตราส่วนแตกต่างจากสีที่กำหนดก็ได้ แต่ต้องมีความเข้มข้นของสีเทียบเท่าสีส้มมาตรฐานที่กำหนดไว้ข้างต้น และใช้วิธีทดสอบตาม (1) หรือ (2)

ก.7 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเตอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15% °C กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 °C, kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, % wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น (Carbon Residue, on 10% distillation residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่วโมง (Oxidation Stability at 110 °C hours)	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100 กรัม (Iodine Value, g Iodine/100 กรัม)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester, %wt.)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerine, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group/metals (Na+K) mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group/metals (Ca+Mg mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	prEN 14538
23	ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1) วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มิข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียด
แนบท้ายนี้

ภาคผนวก ง คุณลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลและขานอ้อย

ง.1 ตัวอย่างคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

พารามิเตอร์	หน่วย	แกลบ	เศษไม้	เปลือกไม้
คาร์บอน (Carbon)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	39.1	25.6	23.3
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	4.6	3.2	2.7
ไนโตรเจน (Nitrogen)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.2	0.1	0.2
ออกซิเจน (Oxygen)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	34.7	24.5	20.9
ซัลเฟอร์ (Sulfur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.04	0.02	0.02
ขี้เถ้า (Ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	17.8	1.6	3.1
ความชื้น (Moisture)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	8.2	45.0	50.0
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำ (Lower Heating Value)	เมกะจูล/กิโลกรัม	15.4	10.4	8.5
ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (Higher Heating Value)	เมกะจูล/กิโลกรัม	14.2	8.6	-6.7
ความหนาแน่น (Bulk Density)	กิโลกรัม/ลบ.ม.	150.0	450.0	na

ที่มา : บริษัท ไฟฟ้าชีวมวล จำกัด, 2548

ง.2 คุณสมบัติของขานอ้อย

รายการ	ปริมาณ
1. ความชื้น	50.73%
2. ค่าความร้อน (สูงสุด)	9,243 (ขานอ้อยแห้ง)
3. คาร์บอน	21.33%
4. ไฮโดรเจน	3.06%
5. ซัลเฟอร์	0.03%
6. ไนโตรเจน	0.12%
7. ออกซิเจน	23.29%

ที่มา : WWW.efc.or.th/

ง.3 ความร้อนตามเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ความชื้น (%)	ค่าความร้อน L.C.V (kcal/kg)	ไอน้ำ (ตัน/ตันรานธ้อย)	กระแสไฟ (หน่วย/ตันรานธ้อย)
53	1,750	2.19	219 kW
52	1,800	2.25	225 kW
51	1,850	2.32	232 kW
50	1,900	2.38	238 kW
49	1,950	2.44	244 kW
48	2,000	2.50	250 kW

ที่มา : Final Drawing Vol.1 : TAKUMA Co., Ltd. August 1990.

หน่วยที่ 8 การตรวจสอบสมรรถนะและความปลอดภัย

ในการปฏิบัติงานด้านระบบหม้อไอน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบสมรรถนะความสามารถในเทอมต่างๆ อาทิ ประสิทธิภาพทางความร้อน ความสามารถในการผลิตไอน้ำ ขนาดตามอัตราการผลิตไอน้ำหรือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ของหม้อไอน้ำ รวมถึงการตรวจสอบความแข็งแรงของ โครงสร้างและการทำงานของระบบต่างๆ เพื่อยืนยัน ความปลอดภัยในการใช้งานเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ในหน่วยนี้จะได้ กล่าวถึงเทอมดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานของผู้ตรวจประเมิน และตรวจสอบความปลอดภัยของหม้อไอน้ำที่ดี ต่อไป

8.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานในการตรวจสอบวัดสมรรถนะโดยรวมและเพื่อเป็นข้อปฏิบัติในการตรวจสอบความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำ โดยคำนึงถึงประโยชน์สูงสุด

8.2 ขอบเขตและนิยาม

สำหรับร่างมาตรฐานได้ศึกษารายละเอียด ข้อกำหนด แนวทางปฏิบัติต่างๆ ตามข้อกำหนดและประกาศต่างๆของ หน่วยงานที่รับผิดชอบ ดังรายละเอียด

8.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะการตรวจวัดสมรรถนะและตรวจสอบสภาพโครงสร้างถึง อุปกรณ์ ประกอบ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานตามมาตรฐานและตามที่กฎหมายกำหนด

8.2.2 นิยาม

8.2.2.1 Maximum Continuous Rating (MCR) หมายถึง อัตราการผลิตไอน้ำสูงสุดที่หม้อไอน้ำสามารถ ทำงานได้ต่อเนื่อง ณ ความดัน และอุณหภูมิออกแบบ

8.2.2.2 Boiler Rating หมายถึง อัตราการผลิตไอน้ำต่อหน่วยเวลา อาจกำหนดเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) หรือ ตันต่อชั่วโมง (Ton/hr) ก็ได้

8.2.2.3 Efficiency มีคำจำกัดความเกี่ยวกับประสิทธิภาพอยู่ 4 คำ สำหรับหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม

(ก) ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ (Combustion Efficiency) หมายถึง ความสามารถของหัวเผา เท่านั้นและสัมพันธ์กับความสามารถในการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์ ตัวหม้อไอน้ำเอง นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ หัวเผาที่ได้รับการออกแบบอย่างดีนั้นสามารถทำงาน ได้แม้อากาศส่วนเกินมีเพียงร้อยละ 15-20 ในขณะที่เผาไหม้สารประกอบในเชื้อเพลิงไปเป็น พลังงานที่เป็นประโยชน์

(ข) ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) หมายถึง ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำ คำนี้ไม่ได้ถูกพิจารณาเป็นการสูญเสียความร้อนจากการแผ่ความร้อนและการพาความร้อน เช่น จากเปลือกหม้อไอน้ำ ระบบท่อ และอื่นๆ

- (ค) Boiler Efficiency หมายถึง ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำบอยครั้งถูกใช้แทนค่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้และประสิทธิภาพทางความร้อนค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่แท้จริงนั้นคือการวัดประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงไปเป็นไอน้ำ
- (ง) Fuel to Steam Efficiency หมายถึง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงไปเป็นไอน้ำนั้นสามารถคำนวณได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งตามรหัสมาตรฐานการทดสอบด้านพลังงาน (PTC 4.1) ของ ASME (American Society for Mechanical Engineers) วิธีการคำนวณแบบแรกคือวิธีเปรียบเทียบสิ่งที่ระบบใช้กับสิ่งที่ได้จากระบบ (Input Output Method) และวิธีที่สองคือการสูญเสียความร้อน (Heat Loss Method)
- 8.2.2.4 Boiler Turndown หมายถึง อัตราส่วนระหว่างผลผลิตสูงสุดของหม้อไอน้ำ กับผลผลิตเมื่อหม้อไอน้ำทำงานที่ระดับการเผาไหม้ต่ำ โดยปกติอัตราส่วนจะอยู่ที่ 4 ต่อ 1 ความสามารถของหม้อไอน้ำเมื่ออยู่ที่ระดับการเผาไหม้ต่ำจะทำให้ความถี่ของวัฏจักรไอน้ำลดลง หัวเผาที่ได้รับการปรับแต่งเต็มที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพลดลงจากที่กำหนดไว้ 25% หากภาระของหม้อไอน้ำอยู่ที่ 20% หม้อไอน้ำจะหยุดการทำงานและทำให้เกิดวัฏจักรไอน้ำบอยขึ้น
- 8.2.2.5 Primary Air หมายถึง อากาศที่ถูกใช้สำหรับระบบเผาไหม้ และเป็นอากาศส่วนแรกที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิง
- 8.2.2.6 Secondary Air หมายถึง เป็นอากาศที่เข้าสู่ระบบเผาไหม้ในขั้นที่สองเพื่อช่วยให้การเผาไหม้ที่เริ่มต้นจาก Primary Air นั้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อากาศส่วนนี้ถูกนำเข้าไปที่เตาเผาภายใต้ความดันสูงเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดแข็งเพื่อที่จะสร้างสภาพอากาศที่แปรปรวนเหนือเชื้อเพลิง นี้เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการผสมระหว่างอากาศและก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์
- 8.2.2.7 Tertiary Air หมายถึง เป็นอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ในขั้นที่สามซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์โดย Secondary Air โดยปกติแล้วอากาศประเภทนี้มีความจำเป็นน้อยสำหรับการเผาไหม้
- 8.2.2.8 Stoichiometric หมายถึง สำหรับเทคโนโลยีการเผาไหม้ อากาศที่เรียกว่า “Stoichiometric” คือ ปริมาณของอากาศในทางทฤษฎีที่ต้องการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่ต้องใช้อากาศอื่นเพิ่มเติม “Substoichiometric” คือ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพียงบางส่วนเนื่องจากปริมาณอากาศไม่เพียงพอ
- 8.2.2.9 Balanced Draught หมายถึง สภาวะที่ความดันก๊าซในเตาเผามีขนาดเท่ากับหรือต่ำกว่าเล็กน้อยของความดันบรรยากาศภายในพื้นที่ปิดหรือโครงสร้างที่ปิดล้อมอยู่
- 8.2.2.10 Gross Calorific Value (GCV) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ออกมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในหน่วยปริมาตรของก๊าซหรือมวลของเชื้อเพลิงแบบแข็งหรือเหลว โดยกำหนด

จากน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซึ่งถูกสมมติว่าน้ำนั้นมีการควบแน่นแบบสมบูรณ์ ความร้อนแฝง (Latent Heat) และความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เกิดขึ้น

- 8.2.2.11 Net Calorific Value (NCV) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ออกมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในหน่วยปริมาตรของก๊าซหรือมวลของเชื้อเพลิงแบบแข็งหรือเหลว โดยกำหนดจากน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซึ่งถูกสมมติว่าน้ำยังคงสภาพเป็นไอน้ำ (Vapors)
- 8.2.2.12 Absolute Pressure หมายถึง ผลรวมของความดันเกจและความดันบรรยากาศ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเกจวัดความดันไอน้ำที่หม้อไอน้ำแสดงค่า 9 bars ค่าความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure) จะมีค่าเท่ากับ 90.03 bars
- 8.2.2.13 Atmospheric Pressure หมายถึง เป็นความดันจากน้ำหนักของบรรยากาศ ความดันจะถูกแสดงในหน่วย lb/in^2 หรือ in-Hg หรือ kg/cm^2 ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล 760 mm-Hg หรือ 101.325 kPa หรือ 1.013 bars
- 8.2.2.14 Carbon Monoxide (CO) หมายถึง เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ สารนี้สามารถทำให้เกิดการแน่นหน้าอกสำหรับผู้ป่วยโรคหัวใจ เกิดการปวดหัวและลดการตื่นตัวของผู้ที่ได้รับสาร
- 8.2.2.15 Blow Down หมายถึง การกำจัดน้ำบางส่วนออกจากหม้อไอน้ำเพื่อที่จะควบคุมความเข้มข้นของปริมาณสารละลายและสารแขวนลอยของน้ำที่อยู่ในหม้อไอน้ำ
- 8.2.2.16 Complete Combustion หมายถึง เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง โดยไม่สำคัญว่าการเผาไหม้นั้นสำเร็จได้จากอากาศหรือออกซิเจนส่วนเกินที่เพิ่มเติมเข้ามา หรือจากปริมาณออกซิเจน (อากาศ) ที่ต้องการตามทฤษฎี (Stoichiometric)
- 8.2.2.17 Perfect Combustion หมายถึง เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง โดยใช้ปริมาณออกซิเจน (อากาศ) ที่ระบบต้องการเป็นไปตามทฤษฎี (Stoichiometric)
- 8.2.2.18 Saturated Steam หมายถึง เป็นไอน้ำที่อุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดซึ่งสอดคล้องกับความดันไอน้ำ
- 8.2.2.19 Wet Steam หมายถึง ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ที่มีความชื้นปะปน
- 8.2.2.20 Dry Steam หมายถึง ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) หรือไอน้ำยิ่งยวด (Superheated Steam) ที่ไม่มี ความชื้นปะปน
- 8.2.2.21 Superheated Steam หมายถึง เป็นไอน้ำที่ได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดหรืออุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัว (Saturation Temperature) ซึ่งสอดคล้องกับความดัน ณ ขณะนั้น

- 8.2.2.22 Oxygen trim หมายถึง ตัวตรวจวัดออกซิเจนในคว้นไอเสีย และตัวควบคุมระบบจะเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่แท้จริงกับปริมาณออกซิเจนที่ควรจะเป็น การไหลของอากาศ (หรือเชื้อเพลิง) จะถูกตัดออกโดยตัวควบคุมระบบจนกระทั่งปริมาณออกซิเจนอยู่ในระดับที่ต้องการ ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมในแต่ละระดับของการเผาไหม้นั้นต้องถูกนำไปสร้างเป็นเส้นกราฟที่บ่งบอกลักษณะระดับออกซิเจนที่เหมาะสมโดยเครื่องมือวาดกราฟ การตัดออกซิเจนออก (Oxygen Trim) นั้นจะรักษาระดับอากาศส่วนเกิน (Excess Air) สำหรับหัวเผาให้น้อยที่สุดไม่ว่าจะเป็นแบบอัตราการเผาไหม้ต่ำหรือสูง (Low and High Fire) หัวเผาที่ไม่มีอุปกรณ์ตัดออกซิเจนต้องทำงานร่วมกับอากาศส่วนเกินที่มากเป็นพิเศษเพื่อให้เกิดการทำงานที่ปลอดภัยในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของอากาศ เชื้อเพลิง และสิ่งเกี่ยวข้องอื่นๆ
- 8.2.2.23 Heat Transfer Mediums หมายถึง สื่อนำความร้อน ซึ่งมีหลายประเภท เช่น ใช้น้ำ น้ำร้อน และน้ำมันร้อน ใช้น้ำและน้ำร้อนเป็นประเภทที่นิยมใช้มากที่สุด และสมควรที่จะได้รับการตรวจสอบคุณสมบัติด้านการนำความร้อนและคุณสมบัติอื่นที่เกี่ยวข้อง
- 8.2.2.24 Thermic Fluid หมายถึง ของเหลวประเภทนี้ถูกใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอุตสาหกรรมและเครื่องจักรให้ความร้อนบางประเภท ของเหลวนี้อาจเป็นน้ำมันที่มีส่วนผสมจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันแร่ และน้ำมันนี้จะถูกเพิ่มอุณหภูมิโดยไม่มีผลจำเป็นต้องปรับความดัน อัตราการไหลสัมพัทธ์และอุณหภูมิไหลกลับอาจจำกัดโอกาสในการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ถ้าระบบอื่นๆไม่สามารถดูดซับความร้อนนี้ไปได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ การออกแบบและเลือกใช้อย่างระมัดระวังนั้นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 8.2.2.25 Hot water หมายถึง น้ำเป็นของเหลวซึ่งมีความหนาแน่นปานกลาง มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง ความหนืดต่ำและมีค่าการนำความร้อนค่อนข้างน้อย ที่อุณหภูมิประมาณ 70-90 °C น้ำร้อนเหมาะสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ให้ความร้อนขนาดเล็ก
- 8.2.2.26 Steam หมายถึง น้ำได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้น ความร้อนที่ถูกเพิ่มเข้าไปนี้เรียกว่าความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) และรูปแบบของความร้อนนี้ถูกเรียกว่าเอนทัลปี (Enthalpy) จุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการคำนวณเอนทัลปีคือที่อุณหภูมิ 0 °C เมื่อน้ำถึงจุดเดือด ความร้อนที่เพิ่มเติมเข้ามาจะทำให้ น้ำบางส่วนกลายสภาพจากของเหลวไปเป็นไอ เช่นการเปลี่ยนไปเป็นไอน้ำ ความร้อนที่ต้องการในการเปลี่ยนสภาพนี้ถูกเรียกว่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (Latent heat of Evaporation) และถูกแสดงในรูปของมวลของน้ำ เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงสถานะ ไอน้ำจะอยู่ในภาวะสมดุล (Equilibrium) กับน้ำ ภาวะสมดุลนี้เรียกว่า “ภาวะอิ่มตัว (Saturation Conditions)” ภาวะอิ่มตัวนี้เกิดขึ้นได้ในทุกขนาดความดันแม้ว่าในทุกๆขนาดความดันนั้นจะมีอุณหภูมิเพียงค่าเดียวที่ภาวะอิ่มตัวจะเกิดขึ้นได้ ถ้ายังมีการให้ความร้อนแก่ไอน้ำอิ่มตัวเพิ่มเติม อุณหภูมิของไอน้ำจะสูงขึ้นและไอน้ำนี้จะกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด (Superheated Steam) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่อยู่เหนือภาวะอิ่มตัวนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อการเพิ่มขึ้นของเอนทัลปี

8.3 มาตรฐานในการใช้อ้างอิง

8.3.1 มาตรฐานอังกฤษ (British Standard, BS845: 1987)

มาตรฐานอังกฤษ (BS845: 1987) ได้อธิบายวิธีการและเงื่อนไขที่หม้อไอน้ำควรจะถูกทดสอบเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพได้ สำหรับการทดสอบที่จะต้องถูกดำเนินการนั้น หม้อไอน้ำควรจะทำนภายใต้อภาระ (Load) คงที่ ซึ่งปกติแล้วจะเป็นสภาวะที่รับภาระเต็มที่ (Full Load) การอ่านผลจะทำในช่วงเวลาหลังจากที่หม้อไอน้ำทำงานภายใต้อภาระคงที่แล้วหนึ่งชั่วโมงเพื่อให้สามารถคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำถูกแสดงเป็นเครื่องหมาย % ของปริมาณความร้อนที่ใช้งานได้ ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์พลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ค่าที่ได้นี้จะถูกแสดงบนพื้นฐานของค่าความร้อนรวม (Gross Calorific Value: GCV) นี้เกี่ยวข้องกับการรักษาสมดุลพลังงานแบบสมบูรณ์ซึ่งแบ่งออก 2 ส่วน

8.3.1.1 ส่วนที่หนึ่งเกี่ยวกับหม้อไอน้ำมาตรฐาน ซึ่งถูกกำหนดให้ใช้วิธีทางอ้อม

8.3.1.2 ส่วนที่สองเกี่ยวกับโรงงานที่มีความซับซ้อนที่ซึ่งมีการไหลเวียนของพลังงานได้หลายช่องทาง ในกรณีนี้สามารถใช้วิธีแบบทางตรงหรือทางอ้อมกับบางส่วนหรือทั้งหมดได้

8.3.2 2 มาตรฐาน ASME: PTC-4-1 (รหัสการทดสอบสำหรับเครื่องผลิตไอน้ำ) ประกอบด้วย

8.3.2.1 ส่วนที่หนึ่ง: วิธีทางตรง (หรือเรียกว่า Input-output Method)

8.3.2.2 ส่วนที่สอง: วิธีทางอ้อม (หรือเรียกว่า Heat Loss Method)

8.3.3 มาตรฐาน IS 8753: มาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของประเทศอินเดีย

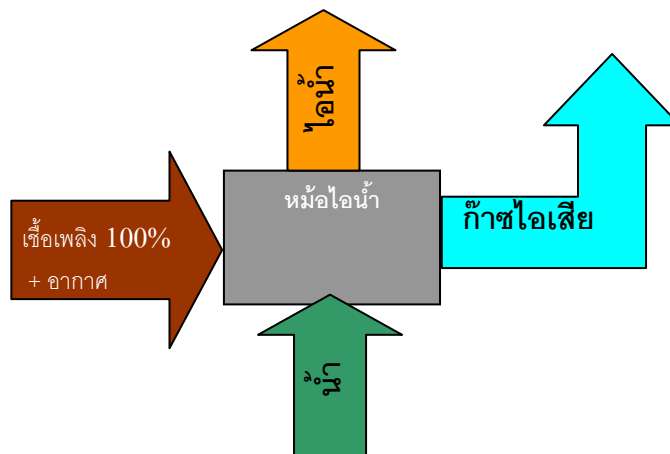
มาตรฐานส่วนใหญ่สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำรวมถึงมาตรฐาน IS 8753 และ BS845 ถูกออกแบบเพื่อการตรวจวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบเฉพาะจุด มาตรฐานเหล่านี้ไม่ได้รวมการระบายทิ้ง (Blow Down) เป็นการสูญเสียประเภทหนึ่งในขั้นตอนการพิจารณาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

โดยพื้นฐานแล้วประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการต่อไปนี้

8.3.3.1 การทดสอบโดยวิธีทางตรง

เป็นวิธีที่พลังงานที่เพิ่มขึ้นของของเหลว (น้ำและไอน้ำ) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับพลังงานของเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ วิธีการนี้ถูกรู้จักอีกชื่อหนึ่งว่าเป็นวิธีแบบ “Input-out Method” ด้วยเนื่องจากความจริงที่ว่าเป็นวิธีที่ต้องการรู้เพียงค่าพลังงานของสิ่งที่ระบบสร้างได้ (ไอน้ำ) และค่าพลังงานที่ใส่เข้าไป (เชื้อเพลิง) สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ การประเมินประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยการใช้สูตร

$$\text{ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ} = \frac{\text{พลังงานที่ออกจากระบบ} \times 100}{\text{พลังงานที่ใส่ในระบบ}} \quad (8-1)$$



รูปที่ 8.1 แสดงการประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{การเพิ่มของพลังงานในไอน้ำ}}{\text{พลังงานรวมในเชื้อเพลิง}} \times 100 \quad (8-2)$$

$$\text{ประสิทธิภาพในหม้อไอน้ำ} = \frac{\text{อัตราการไหลของไอน้ำ} \times (\text{พลังงานในไอน้ำ} - \text{พลังงานของน้ำไหลเวียน})}{\text{อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง} \times \text{ค่าความร้อนรวม (GCV)}} \times 100 \quad (8-3)$$

(ก) การตรวจวัดที่จำเป็นสำหรับการทดสอบโดยวิธีทางตรง

พลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ (Heat Input) : ทั้งพลังงานที่ใส่เข้าไปและที่ออกจากระบบต้องถูกตรวจวัด การตรวจวัดพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของมวลหรือปริมาตรตามประเภทของเชื้อเพลิง

สำหรับเชื้อเพลิงประเภทก๊าซ : มาตรวัดก๊าซที่ผ่านการรับรองสามารถนำมาใช้วัด และปริมาตรที่ถูกวัดต้องถูกปรับแก้ตามอุณหภูมิความดันของก๊าซ ตัวอย่างก๊าซสามารถถูกเก็บเพื่อใช้ในการประเมินค่าความร้อน แต่การใช้ค่าความร้อนจากข้อมูลของผู้จำหน่ายก๊าซนั้นเป็นค่าที่ยอมรับได้

สำหรับเชื้อเพลิงประเภทของเหลว : น้ำมันหนักนั้นมีค่าความหนืดมาก และคุณสมบัติมันเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิ มาตรวัดซึ่งปกติถูกติดตั้งที่อุปกรณ์เผาไหม้ควรถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้แบบคร่าวๆเท่านั้น สำหรับการทดสอบต้องใช้มาตรวัดที่ถูกปรับค่าสำหรับน้ำมันแต่ละประเภทภายใต้อุณหภูมิที่แท้จริง และจะดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับถังเก็บน้ำมันชั่วคราวที่ถูกปรับแต่งอย่างถูกต้อง

สำหรับเชื้อเพลิงประเภทของแข็ง : การตรวจวัดที่แม่นยำสำหรับการไหลของถ่านหินและเชื้อเพลิงแข็งประเภทอื่นนั้นสามารถทำได้ยากมาก การตรวจวัดจึงต้องอาศัยการวัดจากมวลซึ่งหมายความว่า อุปกรณ์ขนาดใหญ่ต้องถูกติดตั้งที่ห้องหม้อไอน้ำ ตัวอย่างทดสอบต้องถูกนำออกมาแล้วห่อใส่ถุงตลอดช่วงเวลาการทดสอบ จากนั้นห่อตัวอย่างจะถูกส่งไปที่ห้องทดลองเพื่อการวิเคราะห์ค่าความร้อนรวม สำหรับห้องหม้อไอน้ำแบบใหม่นั้น ปัญหานี้ลดลงโดยการติดตั้งเครื่องป้อนเชื้อเพลิง (Hopper) เหนือหม้อไอน้ำและอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนัก (Load Cell) แต่วิธีการนี้ยังไม่แพร่หลาย

พลังงานที่ออกจากระบบ (Heat output)

มีหลายวิธีที่สามารถใช้เพื่อการตรวจวัดพลังงานที่ออกจากระบบ สำหรับหม้อไอน้ำนั้นมาตรวัดไอน้ำสามารถใช้วัดอัตราการไหลของไอน้ำแต่ค่าที่ได้นั้นต้องถูกปรับแก้ตามสภาพอุณหภูมิและความดัน เมื่อหลายปีก่อนหน้านี้การตรวจวัดแบบที่กล่าวมาข้างต้นไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากความแม่นยำของมาตรวัดแบบ Orifice และ Venturi ในการตรวจวัดอัตราการไหลไม่แน่นอน แต่ในปัจจุบันการตรวจวัดนั้นสามารถทำได้โดยใช้มาตรวัดที่ทันสมัยประเภท Variable-orifice หรือ Vortex-shedding

ทางเลือกอื่นสำหรับหม้อไอน้ำขนาดเล็กคือการวัดน้ำไหลเวียนเข้าระบบ วิธีนี้สามารถทำได้โดยการปรับตั้งถังเก็บน้ำและจุดบันทึกระดับน้ำระหว่างเริ่มทดสอบและสิ้นสุดการทดสอบต้องระวังไม่ให้เกิดการสูบน้ำเข้ามาในถังระหว่างการทดสอบ พลังงานที่ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อที่จะเปลี่ยนน้ำที่ไหลเข้าระบบไปเป็นไอน้ำจะถูกพิจารณาว่าเป็นพลังงานที่ออกจากระบบ

ในกรณีที่หม้อไอน้ำมีการระบายน้ำออกเป็นระยะๆนั้น การระบายน้ำออกต้องถูกพักไว้ชั่วคราวระหว่างการทดสอบ ในกรณีที่หม้อไอน้ำมีการระบายน้ำออกอย่างต่อเนื่อง การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการระบายต้องถูกคำนวณและถูกบวกกลับเข้าไปในปริมาณความร้อนของไอน้ำ

- (ข) ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางตรง: การคำนวณและตัวอย่างข้อมูลทดสอบและการคำนวณ

อัตราการใช้น้ำและถ่านหินสำหรับหม้อไอน้ำแบบเชื้อเพลิงถ่านหินถูกวัดทุกชั่วโมง ถ่านหินที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วจะถูกป้อนเข้าไปที่หม้อไอน้ำระหว่างการตรวจสอบ ในเวลาเดียวกันระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกจดบันทึกเพื่อใช้ในการคำนวณการสร้างไอน้ำ (Steam generation) ระหว่างการตรวจสอบ การระบายน้ำออกถูกพักไว้ระหว่างการทดสอบ ข้อมูลจากการตรวจวัดถูกแสดงด้านล่างนี้

ตารางที่ 8.1 ประเภทหม้อไอน้ำ: แบบเชื้อเพลิงถ่านหิน

ข้อมูลพลังงานที่ออกจากระบบ (Heat Output Data)	
ปริมาณไอน้ำที่สร้างได้	: 8 ton/hr
ความดันไอน้ำ/อุณหภูมิ	: 10 kg/cm ² /180°C
ค่าพลังงานของไอน้ำ (แห้งและอิ่มตัว) ที่ความดัน 10 kg/cm ²	: 2784 kJ/kg
อุณหภูมิน้ำไหลเวียนในระบบ	: 85°C
ค่าพลังงานของน้ำไหลเวียนในระบบ	: 356 kJ/kg
ข้อมูลพลังงานที่ป้อนเข้าระบบ (Heat Input Data)	
ปริมาณถ่านหินที่ใช้	1.6 ton/hr
ค่าความร้อนรวม (GCV) ของถ่านหิน	16743 kJ/kg

การคำนวณ

$$\text{ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ } (\eta) = \frac{Q \times (H-h) \times 100}{q \times \text{GCV}}$$

เมื่อ

Q	=	ปริมาณไอน้ำที่ถูกสร้างขึ้นต่อชั่วโมง (kg/hr)
q	=	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกใช้ต่อชั่วโมง (kg/hr)
GCV	=	ค่าพลังงานความร้อนรวมของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
H	=	พลังงานของไอน้ำ (kJ/kg)
h	=	พลังงานของน้ำไหลเวียนในระบบ (kJ/kg)

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (η)

$$= \frac{8 \text{ (ton/hr)} \times 1000 \text{ (kg/ton)} (2784-356)}{1.6 \text{ (ton/hr)} \times 1000 \text{ (kg/ton)} \times 16743 \text{ (kJ/kg)}} \times 100$$

$$= 72.5\%$$

$$\text{อัตราการผลิตไอน้ำ} = 8 \text{ ton (ไอน้ำ)} / 1.6 \text{ ton (ถ่านหิน)}$$

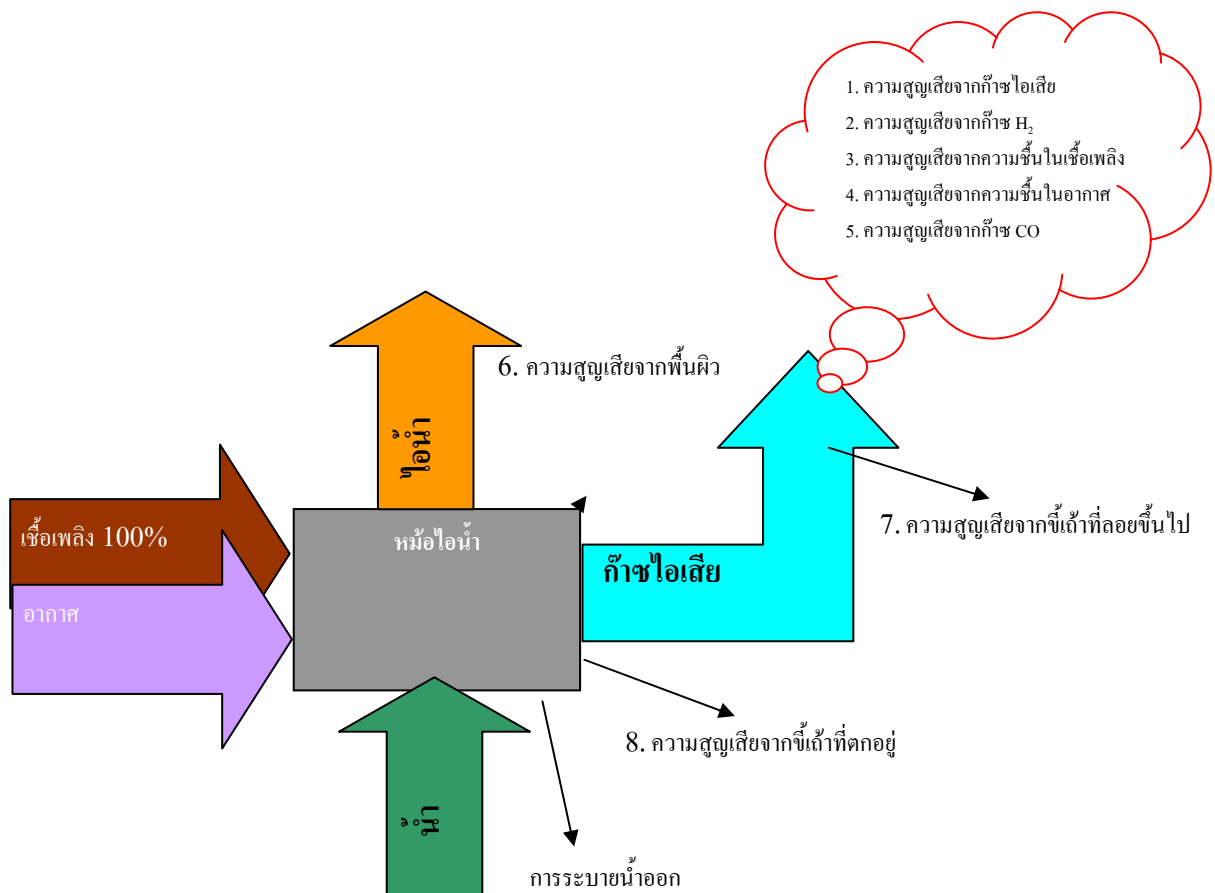
$$= 5$$

8.3.3.2 การทดสอบโดยวิธีทางอ้อม

เป็นวิธีวัดประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากความต่างระหว่างพลังงานที่สูญเสียไปกับพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ ประสิทธิภาพสามารถวัดได้โดยการวัดความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการที่จะถูกอธิบายต่อจากนี้ ข้อเสียของวิธีทางตรงสามารถแก้ไขได้โดยวิธีการนี้ซึ่งจะสามารถคำนวณการสูญเสียความร้อนประเภทต่างที่หม้อไอน้ำได้ เราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพได้จากหลักการสูญเสียความร้อนจากจำนวนเต็ม 100 ข้อดีที่สำคัญของวิธีนี้ก็คือค่าความผิดพลาด (Error) จากการตรวจวัดไม่ได้ส่งผลต่อการคำนวณค่าประสิทธิภาพมากนัก ดังนั้นถ้า

หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 90% และมีค่าความผิดพลาด 1% จากวิธีทางตรง จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงไปมาก ยกตัวอย่างเช่น $90 \pm 0.9 = 89.1$ ถึง 90.9% แต่สำหรับวิธีทางอ้อม ค่าความผิดพลาด 1% ในการวัดการสูญเสียจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ค่าประสิทธิภาพ = $100 - (10 \pm 0.1) = 90 \pm 0.1 = 89.9$ ถึง 90.1% การสูญเสียความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำ คือ



รูปที่ 8.1 แสดงการสูญเสียความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำ

$$\text{ประสิทธิภาพ} = 100 - (1+2+3+4+5+6+7+8) \quad (\text{วิธีแบบทางอ้อม})$$

ความสูญเสียต่อไปนี้จะเกิดขึ้นกับหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแบบของเหลว ก๊าซ และของแข็ง

L1- การสูญเสียจากไอเสียแห้ง (ความร้อนสัมผัส)

L2- การสูญเสียจากก๊าซไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (H₂)

L3- การสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง (H₂O)

L4- การสูญเสียจากความชื้นในอากาศ (H₂O)

L5- การสูญเสียจากก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

L6- การสูญเสียจากการแผ่ความร้อนและการพาความร้อน และอื่นๆ*

* การสูญเสียความร้อนที่มีค่าน้อยและยากต่อการตรวจวัด

ความสูญเสียต่อไปนี้จะเกิดขึ้นกับหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแบบของแข็งเพิ่มเติมจากด้านบน

L7- การสูญเสียจากการเผาไหม้สมบูรณ์ของขี้เถ้าที่ลอยขึ้นไปในอากาศ (คาร์บอน)

L8- การสูญเสียจากการเผาไหม้สมบูรณ์ของขี้เถ้าที่ตกอยู่ด้านล่างห้องเผาไหม้ (คาร์บอน)

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม = $100 - (L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8)$

8.3.3.3 การตรวจวัดที่จำเป็นสำหรับทดสอบความสามารถในการทำงาน

ตัวแปรด้านล่างนี้จำเป็นต้องถูกตรวจวัดเพื่อใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานของหม้อไอน้ำ

a) การวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

1. เปอร์เซ็นต์ของ CO_2 หรือ O_2 ในก๊าซไอเสีย
2. เปอร์เซ็นต์ของ CO ในก๊าซไอเสีย
3. อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย

b) การวัดอัตราการไหลของ

1. เชื้อเพลิง
2. ไอน้ำ
3. น้ำไหลเวียนในระบบ
4. น้ำที่ผ่านการควบแน่น
5. อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

c) การวัดอุณหภูมิสำหรับ

1. ก๊าซไอเสีย
2. ไอน้ำ
3. น้ำที่ใช้เช็คเชยการสูญเสียในระบบ
4. น้ำที่ผ่านการควบแน่น
5. อากาศสำหรับการเผาไหม้
6. เชื้อเพลิง
7. น้ำไหลเวียนในหม้อไอน้ำ

d) การวัดความดันสำหรับ

1. ไอน้ำ
2. เชื้อเพลิง
3. อากาศเพื่อการเผาไหม้ ทั้งแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ
4. ภายในท่อ

e) สภาพน้ำ

1. สารแขวนลอยทั้งหมด (TDS)
2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
3. อัตราการระบายน้ำออกและปริมาณน้ำที่ระบายออก

ตัวแปรทั้งหลายที่ได้กล่าวถึงข้างต้นสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือดังแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.2 เครื่องมือวัดทั่วไปสำหรับการประเมินความสามารถของหม้อไอน้ำ

เครื่องมือ	ประเภท	การตรวจวัด
ตัววิเคราะห์ก๊าซไอเสีย	เคลื่อนที่ได้หรือติดตั้งกับที่	% CO ₂ O ₂ และ CO
เครื่องวัดอุณหภูมิ	แท่งวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) และแบบของเหลวในหลอดแก้ว	อุณหภูมิของเชื้อเพลิง ก๊าซไอเสีย อากาศสำหรับเผาไหม้ พื้นผิวของหม้อไอน้ำ และไอน้ำ
เกจความดัน (Draft Gauge)	มาโนมิเตอร์ (Manometer) และแบบผลต่างความดัน (Differential Pressure)	ปริมาณของความดันที่ถูกใช้งาน หรือมีอยู่ในระบบ
มาตรวัดสารแขวนลอย (TDS Meter)	แบบความนำไฟฟ้า (Conductivity)	สารแขวนลอยในน้ำของหม้อไอน้ำ น้ำไหลเวียนในระบบ และในน้ำที่เติมเข้าในระบบ (Make-up Water)
มาตรวัดอัตราการไหล	ตามความเหมาะสม	อัตราการไหลของไอน้ำ น้ำ เชื้อเพลิง และอากาศ

8.3.3.4 สภาพการทดสอบ และข้อระมัดระวังสำหรับการทดสอบโดยวิธีทางอ้อม

A) การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ

- การสูญเสียในช่วงเตรียมพร้อม (Standby Losses) การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำนั้นจะถูกดำเนินการในขณะที่หม้อไอน้ำกำลังทำงานภายใต้ภาระคงที่ (Steady Load) ดังนั้นประสิทธิภาพของการเผาไหม้ไม่ได้เปิดเผยให้เห็นถึงความสูญเสียในช่วงเตรียมพร้อมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการจุดไฟ
- การสูญเสียจากการระบายออก (Blown Down Loss) ปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปโดยการระบายน้ำออกเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงกว้าง
- ไอน้ำสำหรับเป่าเขม่าดำ (Soot Blower Steam) ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการเป่าเขม่าดำนั้นเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อเพลิง
- พลังงานที่สูญเสียไปให้อุปกรณ์ช่วยการทำงาน (Auxiliary Equipment Energy Consumption) ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ไม่สามารถอธิบายการใช้พลังงานของอุปกรณ์ช่วยในการทำงาน เช่น หัวเผา พัดลม และปั๊ม

B) การเตรียมพร้อมและสภาพก่อนการทดสอบ

- เผาไหม้เชื้อเพลิงที่กำหนดที่อัตราการเผาไหม้ที่ต้องการ
- ทำการทดสอบขณะที่หม้อไอน้ำอยู่ภายใต้ภาระคงที่ (Steady Load) หลีกเลี่ยงการทดสอบระหว่างการอุ่นหม้อไอน้ำ
- ใช้แผนภูมิหรือตารางเพื่อเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมที่จำเป็น

- กำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงาน
- ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์เชื้อเพลิงและก๊าซ
- ตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงและก๊าซจากห้องทดลอง
- ตรวจสอบประเภทการระบายออกและวิธีการตรวจวัด
- ตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมด
- ตรวจสอบการไหลเข้ามาปะปนของอากาศในบริเวณห้องเผาไหม้

C) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสีย

ท่อทางออกของไอเสียควรถูกตรวจสอบเพื่อหาตำแหน่งพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงสุด และดูเหมือนจะเป็นความบังเอิญที่จุดๆนั้นจะเป็นตำแหน่งที่มีอัตราการไหลของก๊าซสูงที่สุด ดังนั้นจุดดังกล่าวจึงเป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับการเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิและก๊าซ

D) ทางเลือกในการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

เปรียบเทียบการทดสอบออกซิเจน (Oxygen Test) กับการทดสอบคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Test)

ถ้าเครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจนแบบต่อเนื่องถูกติดตั้งที่ห้องหม้อไอน้ำ ให้ใช้การทดสอบออกซิเจน ในบางโอกาสให้ใช้เครื่องตรวจวัดแบบพกพาที่สามารถวัดได้ทั้งปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในการตรวจสอบ ถ้าผลลัพธ์จากการทดสอบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ตรงกับผลที่ได้จากการทดสอบออกซิเจน แสดงว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น การทดสอบอันใดอันหนึ่งหรือทั้งสองอาจมีความผิดพลาด บางทีอาจเป็นเพราะสารเคมีทดสอบเก่า หรือการปรับตั้งอุปกรณ์ไม่เหมาะสม ความเป็นไปได้อื่นคือ อากาศภายนอกรั่วไหลเข้ามาที่ท่อไอเสีย นี่เกิดขึ้นได้หากบริเวณห้องเผาไหม้ทำงานภายใต้ความดันแบบดูด (Negative Pressure) และมีการรั่วซึมในตัวหม้อไอน้ำ

การทดสอบคาร์บอนมอนนอกไซด์

ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ในควันไอเสียเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และเกิดได้กับเชื้อเพลิงทุกประเภททราบได้ที่เชื้อเพลิงยังมีการ์บอนเป็นส่วนประกอบ คาร์บอนมอนนอกไซด์ในก๊าซไอเสียโดยปกติแล้วจะมีปริมาณต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซอื่น แต่จะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากเมื่อการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

E) การวางแผนการทดสอบ

- การทดสอบจะใช้เวลาประมาณ 4-8 ชั่วโมงในวันทำงานปกติ
- การวางแผนล่วงหน้าเป็นสิ่งจำเป็นในการที่จะจัดเตรียมกำลังคน เชื้อเพลิง น้ำ และเครื่องมือเพื่อการตรวจสอบ นอกเหนือจากนี้ต้องสื่อสารทำความเข้าใจกับผู้ดูแลหม้อไอน้ำและฝ่ายผลิต
- ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำที่เพียงพอจำเป็นสำหรับการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อให้การทดสอบไม่ติดขัดเนื่องจากการไม่มีน้ำมันหรือน้ำเพื่อการทดสอบ
- จุดสำหรับเก็บตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างต้องถูกเตรียมพร้อมสำหรับการทำงาน

- การวิเคราะห์ในห้องทดลองนั้นควรถูกดำเนินการเพื่อทดสอบเชื้อเพลิง ก๊าซไอเสีย และน้ำ โดยความร่วมมือจากเจ้าหน้าที่ในห้องทดลอง
- ตารางข้อมูลเกี่ยวกับไอน้ำ แผนภูมิไซโครเมทรี (Psychrometric Chart) และเครื่องคิดเลขต้องถูกเตรียมไว้เพื่อการคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

8.3.3.5 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม

ในการที่จะคำนวณประสิทธิภาพโดยวิธีทางอ้อมได้นั้น ความสูญเสียทุกประเภทที่เกิดขึ้นได้นั้นต้องถูกกำหนดขึ้นมา ความสูญเสียเหล่านี้สัมพันธ์กับปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ ด้วยแนวทางนี้จึงเป็นเรื่องง่ายในการที่จะเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของหม้อไอน้ำหลายๆประเภทโดยการจัดลำดับที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 8.3 สูตรการแปลงค่าสำหรับการวิเคราะห์แบบประมาณการจนถึงแบบละเอียด

สูตรการแปลงค่าสำหรับการวิเคราะห์แบบประมาณการจนถึงแบบละเอียด				
%C	=	$0.97C + 0.7(VM + 0.1A) - M(0.6 - 0.01M)$		
%H ₂	=	$0.036C + 0.086(VM - 0.1xA) - 0.0035M(1 - 0.02M)$		
%N ₂	=	$2.10 - 0.020 VM$		
เมื่อ C	=	% คาร์บอน		
A	=	% จี๊เส้า		
VM	=	% สารระเหย		
M	=	% ความชื้น		

แต่อย่างไรก็ตามควรจะทำการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแบบละเอียดเป็นระยะๆ โดยทำการทดสอบที่สถาบันที่มีชื่อเสียง

อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและน้ำมันในทางทฤษฎี (Stoichiometric) และอากาศส่วนเกินต้องถูกพิจารณาเป็นอันดับแรกในการคำนวณการสูญเสียของหม้อไอน้ำ สูตรการคำนวณถูกแสดงดังตารางที่ 8.4 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 8.4 อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและน้ำมันในทางทฤษฎี (Stoichiometric) และอากาศส่วนเกิน

a) ปริมาณอากาศที่ต้องการในทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้	=	$[(11.6 \times C) + \{34.8 \times (H_2 - O_2/8)\} + (4.35 \times S)]/100$ kg/kgของเชื้อเพลิง [จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิง]
		เมื่อ C H ₂ O ₂ และ S เป็นเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง

b) % อากาศส่วนเกินที่เข้ามา (EA)	=	$\frac{O_2 \%}{21 - O_2 \%} \times 100$ [จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย]
		โดยปกติการตรวจปริมาณวัดออกซิเจนนั้นเป็นสิ่งที่ควรกระทำ ถ้าในกรณีที่การตรวจวัดนั้นทำไม่ได้ ให้ใช้การตรวจวัด CO ₂ แทน
		$\frac{7900 \times [(CO_2 \%)_t - (CO_2 \%)_a]}{(CO_2 \%)_a \times [100 - (CO_2 \%)_t]}$ [จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย]
เมื่อ		
$(CO_2 \%)_t$	=	CO ₂ ในทางทฤษฎี
$(CO_2 \%)_a$	=	CO ₂ % ที่วัดได้จริงในก๊าซไอเสีย
$(CO_2)_t$	=	$\frac{\text{จำนวนโมลของ C}}{\text{จำนวนโมลของ N}_2 + \text{จำนวนโมลของ C}}$
จำนวน โมลของ N ₂	=	$\frac{\text{น้ำหนักของ N}_2 \text{ ในอากาศตามทฤษฎี} + \text{น้ำหนักของ N}_2 \text{ ในเชื้อเพลิง}}{\text{น้ำหนักโมลของ N}_2}$
จำนวน โมลของ C	=	$\frac{\text{น้ำหนักของ C ในเชื้อเพลิง}}{\text{น้ำหนักโมลของ C}}$
c) มวลของอากาศที่แท้จริงที่เข้ามา / kg ของเชื้อเพลิง (AAS)	=	{1 + EA/100} x อากาศในทางทฤษฎี

การสูญเสียประเภทต่างๆ ในการทำงานของหม้อไอน้ำถูกแสดงด้านล่างนี้พร้อมกับสูตรการคำนวณที่จำเป็น

1) การสูญเสียความร้อนเนื่องจากก๊าซไอเสียแห้ง

การสูญเสียประเภทนี้ถือว่าการสูญเสียที่มากที่สุดและสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$L_1 = \frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{60 \times \text{eff. fuel}} \times 100 \quad (8-4)$$

เมื่อ

- L1 = % การสูญเสียความร้อนเนื่องจากก๊าซไอเสีย
- m = มวลของก๊าซไอเสีย (kg/kg ของเชื้อเพลิง)
 ผลผลิตจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง: CO₂ + SO₂ + N₂ ในเชื้อเพลิง + N₂ ในอากาศ + O₂ ในก๊าซเชื้อเพลิง (น้ำและไอน้ำในก๊าซเชื้อเพลิงไม่ควรนำมาพิจารณา)
- Cp = ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย (kJ/kg)
- Tf = อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (°C)
- Ta = อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (Ambient) (°C)

2) การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการกลายเป็นไอของน้ำที่ก่อตัวจาก H₂ ในเชื้อเพลิง (%)

การเผาไหม้ของไฮโดรเจนก่อให้เกิดการสูญเสียความร้อนเพราะว่าสิ่งที่ได้จากการเผาไหม้คือน้ำ น้ำที่ได้นี้จะถูกแปลงเป็นไอน้ำซึ่งจะนำพาความร้อนออกไปในรูปของความร้อนแฝง

$$L_2 = \frac{H_2 \times (2442 + C_p(T_f - T_a))}{\text{GCV of fuel}} \times 100 \quad (8-5)$$

เมื่อ

- H₂ = มวลของไฮโดรเจน (kg) ในเชื้อเพลิง 1 kg
C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำยิ่งยวด (kJ/kg°C)
T_f = อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (°C)
T_a = อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (°C)
2445 = ค่าความร้อนแฝงที่สอดคล้องกับความดันของไอน้ำ

3) การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง

ความชื้นที่เข้าสู่หม้อไอน้ำจะออกจากหม้อไอน้ำในรูปของไอน้ำยิ่งยวด การสูญเสียความชื้นนี้จะสร้างความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ที่จะนำความชื้นไปสู่จุดเดือด ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของความชื้น และกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวดเพื่อจะนำไอน้ำนี้ไปสู่อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย การสูญเสียประเภทนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

$$L_3 = \frac{M \times (2442 + C_p(T_f - T_a))}{\text{GCV of fuel}} \times 100 \quad (8-6)$$

เมื่อ

- M = มวลของความชื้น (kg) ในเชื้อเพลิง 1 kg
C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำยิ่งยวด (kJ/kg°C)
T_f = อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (°C)
T_a = อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (°C)
2445 = ค่าความร้อนแฝงที่สอดคล้องกับความดันของไอน้ำ

4) การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความชื้นในอากาศ

ไอน้ำที่อยู่ในรูปของความชื้นในอากาศจะถูกให้ความร้อนจนกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวดเมื่อผ่านหม้อไอน้ำ เมื่อความร้อนนี้ผ่านปล่องไอเสีย มันจึงต้องถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียของหม้อไอน้ำ

เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียประเภทนี้กับมวลของเชื้อเพลิงที่ถูกเผา จึงจำเป็นต้องทราบปริมาณความชื้นของอากาศที่ใช้เผาไหม้ และปริมาณของอากาศที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยของมวลของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้เพื่อใช้ในการคำนวณ

มวลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศนั้นสามารถหาได้จากตารางไซโครเมตริก Psychrometric และค่าโดยทั่วไปดังแสดงดังตารางที่ 8.4 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 8.5 ค่าโดยทั่วไปของมวลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศ

กระเปาะแห้ง	กระเปาะเปียก	ความชื้นสัมพัทธ์	มวลของน้ำ (kg) ต่อมวลของอากาศแห้ง (kg) (Humidity factor)
อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	(%)	
20	20	100	0.016
20	14	50	0.008
30	22	50	0.014
40	30	50	0.024

$$L_4 = \frac{\text{AAS Humidity factor} \times (T_f - T_a)}{60^\circ \text{F fuel}} \times 100 \quad (8-7)$$

เมื่อ

- AAS = มวลที่แท้จริงของอากาศในการเผาไหม้ต่อมวล 1 kg ของเชื้อเพลิง
 Humidity Factor = มวลของน้ำ (kg) ต่อมวลของอากาศแห้ง (kg)
 Cp = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำยิ่งยวด (kJ/kg°C)
 Tf = อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (°C)
 Ta = อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (°C) ความดันของไอน้ำ

5) การสูญเสียเนื่องการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ผลผลิตเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สามารถรวมตัวกับออกซิเจนและเผาไหม้อีกครั้งพร้อมทั้งยังปล่อยพลังงานออกมาเพิ่มเติม ผลผลิตเหล่านั้นรวมถึง CO, H₂ และสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ที่สามารถพบได้ทั่วไปในก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำ คาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นก๊าซประเภทเดียวที่สามารถถูกพิจารณาได้อย่างสะดวกในการทดสอบหม้อไอน้ำ

$$L_5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{24042}{60^\circ \text{F fuel}} \times 100 \quad (8-8)$$

เมื่อ

- L₅ = % การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพของ C ไปเป็น CO บางส่วน
 CO = ปริมาตรของ CO ในก๊าซไอเสียที่ออกจาก Economizer (%)
 CO₂ = ปริมาตรที่แท้จริงของ CO₂ ในก๊าซไอเสีย (%)
 C = มวลของสารประกอบคาร์บอน (kg)/ มวลของเชื้อเพลิง (kg)

หรือ

เมื่อ CO ถูกวัดในหน่วย ppm ระหว่างการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

$$\text{การเกิด CO (M}_{\text{co}}) = \text{CO (ppm)} \times 10^{-6} \times M_r \times 28 (M_{\text{co}})$$

$$M_r = \text{การบริโภคเชื้อเพลิง (kg/hr)}$$

$$L_s = M_{\text{co}} \times 24043^*$$

* การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้คาร์บอนบางส่วน

6) การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่ความร้อนและการพาความร้อน

การสูญเสียความร้อนในรูปอื่นได้แก่ การสูญเสียความร้อนจากการแผ่ความร้อน และการพาความร้อนจากหม้อไอน้ำไปสู่สภาพแวดล้อม

โดยปกติการสูญเสียที่พื้นผิวและการสูญเสียอื่นๆที่ตรวจได้ยากจะถูกประมาณค่าขึ้น โดยขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของหม้อไอน้ำดังข้อมูลด้านล่างนี้

หม้อไอน้ำอุตสาหกรรมแบบหลอดไฟ/แบบ packaged = 1.5-2.5%

หม้อไอน้ำแบบหลอดน้ำ = 2-3%

หม้อไอน้ำแบบ Power station = 0.4-1%

อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้ถ้าทราบค่าพื้นที่ของพื้นผิวหม้อไอน้ำ และ อุณหภูมิที่พื้นผิว

$$L_6 = 0.549 \times \left[\left(\frac{T_s}{273} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{273} \right)^4 \right] + 1.957 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{1.6832 V_m + 69.8}{69.8}} \quad (8-9)$$

เมื่อ L_6 = การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่ความร้อน (W/m²)

V_m = ความเร็วลม (m/s)

T_s = อุณหภูมิที่พื้นผิว (K)

T_a = อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (K)

การสูญเสียเนื่องจากการไม่เผาไหม้ของคาร์บอนในรูปของจีเถ้าในอากาศและที่ด้านล่างของหม้อไอน้ำ ปริมาณคาร์บอนจำนวนเล็กน้อยจะตกค้างอยู่ในจีเถ้า และนี่จะเป็นการสูญเสียความร้อนในเชื้อเพลิง เพื่อที่จะประเมินการสูญเสียนี้ ตัวอย่างจีเถ้าจะต้องถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณคาร์บอน เราต้องทราบปริมาณของจีเถ้าที่เกิดขึ้นจากหนึ่งหน่วยของเชื้อเพลิง

7) การสูญเสียความร้อนในรูปของจีเถ้าในอากาศ (%)

$$L_7 = \frac{\text{ปริมาณจีเถ้าทั้งหมดที่เก็บมา/kgของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้} \times \text{GCV ของจีเถ้าในอากาศ}}{\text{GCV ของเชื้อเพลิง}} \times 100 \quad (8-10)$$

8) การสูญเสียความร้อนในรูปของจีเถ้าที่ด้านล่างของหม้อไอน้ำ (%)

$$L_g = \frac{\text{ปริมาณขี้เถ้าทั้งหมดที่เก็บมา/kgของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้} \times \text{GCV ของขี้เถ้า}}{\text{GCV ของเชื้อเพลิง}} \times 100 \quad (8-11)$$

8.4 สมดุลพลังงาน

หลังการคำนวณค่าการสูญเสียตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น การรักษาสสมดุลพลังงานจะช่วยให้หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพคือความแตกต่างระหว่างพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบและการสูญเสียความร้อนที่ได้คำนวณไว้

8.4.1 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ

ตารางที่ 8.6 ตัวอย่างการทำสมดุลพลังงาน

ตัวแปร (Input/ Output parameter)		kJ/kgของเชื้อเพลิง	%
พลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ	=		100
การสูญเสียประเภทต่างๆ			
1. การสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง	=		
2. การสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง	=		
3. การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง	=		
4. การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในอากาศ	=		
5. การเปลี่ยนจาก C ไปเป็น CO	=		
6. การสูญเสียที่พื้นผิว	=		
7. การสูญเสียไปกับขี้เถ้าในอากาศ	=		
8. การสูญเสียไปกับขี้เถ้าที่อยู่ด้านล่างของหม้อไอน้ำ	=		
การสูญเสียทั้งหมด	=		
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ = 100 - (1+2+3+4+5+6+7+8)			

8.4.2 การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

8.4.2.1 หม้อไอน้ำแบบเชื้อเพลิงถ่านหิน

ข้อมูลด้านล่างนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง และเป็นการหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม

ตารางที่ 8.7 ผลจากการคำนวณ

อัตราการเผาไหม้	=	5599.17 kg/hr
อัตราการผลิตไอน้ำ	=	21937.5 kg/hr
ความดันไอน้ำ	=	43 kg/cm ²
อุณหภูมิไอน้ำ	=	377 °C
อุณหภูมิน้ำไหลเวียนในระบบ	=	96 °C
%CO ₂ ในก๊าซไอเสีย	=	14
%CO ในก๊าซไอเสีย	=	0.55
อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซไอเสีย	=	190 °C
อุณหภูมิเฉลี่ยของสภาพแวดล้อม	=	31 °C
ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	=	0.0204 kg/kgของอากาศแห้ง
อุณหภูมิที่พื้นผิวของหม้อไอน้ำ	=	70 °C
ความเร็วลมรอบหม้อไอน้ำ	=	3.5 m/s
พื้นที่ทั้งหมดของพื้นผิวหม้อไอน้ำ	=	90 m ²
ค่า GCV ของเชื้อเพลิงที่ด้านล่างหม้อไอน้ำ	=	3349 kJ/kg
ค่า GCV ของเชื้อเพลิงที่ลอยไปในอากาศ	=	1894 kJ/kg
อัตราส่วนของเชื้อเพลิงที่อยู่ด้านล่างหม้อไอน้ำต่อที่ลอยในอากาศ	=	90:10
การวิเคราะห์เชื้อเพลิง (%)		
ปริมาณเชื้อเพลิงในเชื้อเพลิง	=	8.63
ความชื้นในถ่านหิน	=	31.6
ปริมาณสารคาร์บอน	=	41.65
ปริมาณไฮโดรเจน	=	2.0413
ปริมาณไนโตรเจน	=	1.6
ปริมาณออกซิเจน	=	14.48
ค่า GCV ของถ่านหิน	=	14654 kJ/kg

การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม		
ขั้นตอนที่ 1- หาปริมาณอากาศที่ต้องการ		
ปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี	=	$[(11.6 \times C) + \{34.8 \times (H_2 - O_2/8)\} + (4.35 \times S)]/100$ kg/kgของถ่านหิน
	=	$[(11.6 \times 41.65) + \{34.8 \times (2.0413 - 14.48/8)\} + (4.35 \times 0)]/100$
	=	4.91 kg/kgของถ่านหิน

ขั้นตอนที่ 2- หาปริมาณ CO ₂ %			
% CO ₂ ตามทฤษฎี (CO ₂) _t	=	$\frac{\text{จำนวนโมลของ C}}{\text{จำนวนโมลของ N}_2 + \text{จำนวนโมลของ C}}$	
เมื่อ โมลของ N ₂	=	$\frac{\text{น้ำหนักของ N}_2 \text{ ในอากาศตามทฤษฎี} + \text{น้ำหนักของ N}_2 \text{ ในเชื้อเพลิง}}{\text{น้ำหนักโมลของ N}_2}$	
	=	$\frac{[4.91 \times (77/100)] + 0.016}{28}$	= 0.1356
โมลของ C	=	0.4165/12 = 0.0347	
(CO ₂) _t	=	$\frac{0.0347}{0.1356 + 0.0347}$	= 20.37%

ขั้นตอนที่ 3- ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เข้ามาในระบบ			
ปริมาณ CO ₂ ที่แท้จริงที่ถูกวัด	=	14.0%	
ในก๊าซไอเสีย			
% อากาศส่วนเกิน (EA)	=	$\frac{7900 \times [(CO_2\%)_t - (CO_2\%)_a]}{(CO_2\%)_a \times [100 - (CO_2\%)_t]}$	
	=	$\frac{7900 \times [20.37 - 14]}{14 \times [100 - 20.37]}$	
	=	45.17%	

ขั้นตอนที่ 4- หาปริมาณอากาศที่แท้จริงที่ใช้ในการเผาไหม้			
มวลอากาศที่แท้จริงที่ใช้ใน	=	{1 + EA/100} x อากาศในทางทฤษฎี	
การเผาไหม้	=	{1 + 45.17/100} x 4.91	
	=	7.13 kg/kgของถ่านหิน	

ขั้นตอนที่ 5- หามวลที่แท้จริงของก๊าซไอเสียแห้ง			
มวลที่แท้จริงของก๊าซไอเสีย	=	มวลของ CO ₂ + มวลของ N ₂ ในเชื้อเพลิง + มวลของ N ₂ ในอากาศที่ใช้เผาไหม้ + มวลของ O ₂ ในก๊าซไอเสีย	
	=	$\frac{0.4165 \times 44}{12} + 0.016 + \frac{7.13 \times 77}{100} + \frac{(7.13 - 4.91) \times 23}{100}$	
	=	7.54 kg/kgของถ่านหิน	

ขั้นตอนที่ 6- หาค่าการสูญเสียทั้งหมด	
6.1 %การสูญเสียความร้อนใน ก๊าซไอเสียแห้ง (L1)	$= \frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{\text{GCV of fuel}} \times 100$ $= \frac{7.54 \times 0.96 \times (190 - 31)}{14654} \times 100$ L1 = 7.88%
6.2 %การสูญเสียความร้อน ของการเกิดน้ำจาก H ₂ ใน เชื้อเพลิง (L2)	$= \frac{9 \times H_2 \times \{2445 + C_p(T_f - T_a)\}}{\text{GCV of fuel}} \times 100$ $= \frac{9 \times 0.02041 \times \{2445 + 0.96(190 - 31)\}}{14654} \times 100$ L2 = 3.44%
6.3 %การสูญเสียความร้อน เนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง (L3)	$= \frac{M \times \{2445 + C_p(T_f - T_a)\}}{\text{GCV of fuel}} \times 100$ $= \frac{0.316 \times \{2445 + 0.96(190 - 31)\}}{14654} \times 100$ L3 = 5.91%
6.4 %การสูญเสียความร้อน เนื่องจากความชื้นในอากาศ (L4)	$= \frac{\text{ASS} \times \text{humidity factor} \times C_p \times (T_f - T_a)}{\text{GCV of fuel}} \times 100$ $= \frac{7.18 \times 0.0204 \times 1.88 \times (190 - 31)}{14654} \times 100$ L4 = 0.29%
6.5 %การสูญเสียความร้อน เนื่องจาก CO ₂ บางส่วน เปลี่ยนเป็น CO (L5)	$= \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{24043}{\text{GCV of fuel}} \times 100$ $= \frac{0.55 \times 0.4165}{0.55 + 14} \times \frac{24043}{14654} \times 100$ L5 = 2.58%
6.6 %การสูญเสียความร้อน เนื่องจากการแผ่ความร้อนและ การพาความร้อน (L6)	$= 0.1748 \times \left[\left(\frac{T_a}{273.15} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{273.15} \right)^4 \right] + 1.927 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{(176.85 \times m + 69.97)}{60.9}}$ $= 0.1748 \times \left[\left(\frac{343}{273.15} \right)^4 - \left(\frac{304}{273.15} \right)^4 \right] + 1.927 \times (343 - 304)^{1.25} \times \sqrt{\frac{(176.85 \times 3.6 + 69.97)}{60.9}}$ = 633.3 W/m² = 633.3 x 3.6 = 2279.88 kJ/m² · hr การสูญเสียเนื่องจากการแผ่ = 2279.88 x 90

ความร้อนและการพาความร้อน

ร้อนทั้งหมดต่อชั่วโมง

$$= 205189.2 \text{ kJ/hr}$$

$$\% \text{การสูญเสียของการแผ่ความร้อน} = \frac{205189.2}{14654.59 \times 5597.16} \times 100$$

ร้อนต่อการพาความร้อน

$$L6 = 0.25\%$$

6.7 %การสูญเสียความร้อนเนื่องจากซีเมนต์ที่ลอยไปในอากาศ (L7)

$$\% \text{ซีเมนต์ในถ่านหิน} = 8.63$$

$$\text{อัตราส่วนของซีเมนต์ที่อยู่ด้านล่างของหม้อไอน้ำต่อ} = 90:10$$

ซีเมนต์ที่ลอยในอากาศ

$$\text{GCV ของซีเมนต์ที่ลอยไปในอากาศ} = 1894 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ปริมาณของซีเมนต์ที่ลอยไปในอากาศในถ่านหิน} = 0.1 \times 0.0863 = 0.00863 \text{ kg}$$

1 kg

$$\text{การสูญเสียความร้อนในซีเมนต์ที่ลอยไปใน} = 0.00863 \times 1894 = 16.345 \text{ kJ/kg ของถ่านหิน}$$

อากาศ

$$\% \text{การสูญเสียความร้อนไปกับซีเมนต์ที่ลอยไปใน} = 16.345 \times 100 / 14654$$

อากาศ

$$L7 = 0.11\%$$

6.8 %การสูญเสียความร้อนเนื่องจากซีเมนต์ที่อยู่ด้านล่างของหม้อไอน้ำ (L8)

$$\text{GCV ของซีเมนต์ที่อยู่ด้านล่างของหม้อไอน้ำ} = 3349 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ปริมาณของซีเมนต์ที่อยู่ด้านล่างของหม้อไอน้ำใน} = 0.9 \times 0.0863 = 0.077 \text{ kg}$$

ถ่านหิน 1 kg

$$\text{การสูญเสียความร้อนในซีเมนต์ที่อยู่ด้านล่างของ} = 0.077 \times 3349 = 257.85 \text{ kJ/kg ของถ่านหิน}$$

หม้อไอน้ำ

$$\% \text{การสูญเสียความร้อนไปกับซีเมนต์ที่อยู่ด้านล่าง} = 257.85 \times 100 / 14654$$

ของหม้อไอน้ำ

$$L8 = 1.77\%$$

$$\text{ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม} = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8)$$

$$= 100 - (7.88 + 3.44 + 5.91 + 0.29 + 2.58 + 0.25 + 0.11 + 1.77)$$

$$= 100 - 22.23$$

$$= 77.77\%$$

สรุปข้อมูลสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำแบบเชื้อเพลิงถ่านหิน

ตัวแปร (Input/ Output parameter)		kJ/kgของเชื้อเพลิง	%
พลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ	=	14654	100
การสูญเสียประเภทต่างๆ			
1. การสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง	=	1154.78	7.88
2. การสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง	=	540.10	3.44
3. การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง	=	866.08	5.91
4. การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในอากาศ	=	42.49	0.29
5. การเปลี่ยนจาก C ไปเป็น CO	=	378.06	2.58
6. การสูญเสียที่พื้นผิว	=	36.63	0.25
7. การสูญเสียไปกับจีเฝ้าในอากาศ	=	3.85	0.11
8. การสูญเสียไปกับจีเฝ้าที่อยู่ด้านล่างของหม้อไอน้ำ	=	257.85	1.77
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ = $100 - (L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8) = 77.77\%$			

8.4.2.2 การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบเชื้อเพลิงน้ำมัน

ข้อมูลต่อไปนี้เป็นข้อมูลที่ได้มาจากหม้อไอน้ำที่น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง และหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม

การวิเคราะห์โดยละเอียด (%)		
คาร์บอน	=	84
ไฮโดรเจน	=	12
ไนโตรเจน	=	0.5
ออกซิเจน	=	1.5
ซัลเฟอร์	=	1.5
ความชื้นในเชื้อเพลิง	=	0.5
GCV ของเชื้อเพลิง	=	41858 kJ/kg
อัตราการเผาไหม้	=	2648.125 kg/hr
อุณหภูมิที่พื้นผิวของหม้อไอน้ำ	=	80 °C
พื้นที่ของพื้นผิวหม้อไอน้ำ	=	90 m ²
ความชื้นในอากาศ	=	0.025 kg/kgของอากาศแห้ง
ความเร็วลม	=	3.8 m/s
การวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย (%)		
อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย	=	190 °C
อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม	=	30 °C

% CO ₂ ในก๊าซไอเสียโดยปริมาตร	=	10.8
% O ₂ ในก๊าซไอเสียโดยปริมาตร	=	7.4

a) ปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี	=	$\frac{[(11.6 \times C) + \{34.8 \times (H_2 - O_2/8)\} + (4.35 \times S)]}{100}$ kg/kgของเชื้อเพลิง
	=	$\frac{[(11.6 \times 84) + \{34.8 \times (12 - 1.5/8)\} + (4.35 \times 1.5)]}{100}$
	=	13.92 kg/kgของน้ำมัน
b) % อากาศส่วนเกิน (EA)	=	$\frac{O_2 \%}{21 - O_2 \%} \times 100$ [จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย]
	=	$\frac{7.4}{21 - 7.4} \times 100$
	=	54.4%
c) มวลอากาศที่แท้จริงที่ใช้ในการเผาไหม้ (AAS)	=	$\{1 + EA/100\} \times \text{อากาศที่ต้องการในทางทฤษฎี}$
	=	$\{1 + 54.4/100\} \times 13.92$
	=	21.49 kg/kgของเชื้อเพลิง
d) มวลที่แท้จริงของก๊าซไอเสียแห้ง	=	มวลของ (CO ₂ + SO ₂ + N ₂ + O ₂) ในก๊าซไอเสีย + มวลของ N ₂ ในอากาศที่ใช้เผาไหม้
	=	$\frac{0.84 \times 44}{12} + \frac{0.015 \times 64}{32} + 0.005 + \frac{7.4 \times 23}{100} + \frac{21.49 \times 77}{100}$
	=	21.36 kg/kgของน้ำมัน
e) %การสูญเสียความร้อนในก๊าซไอเสียแห้ง	=	$\frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$
	=	$\frac{21.36 \times 0.96 \times (190 - 31)}{41858} \times 100$
	L1 =	7.86%
f) %การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการกลายเป็นไอของน้ำเนื่องจาก H ₂ ในเชื้อเพลิง	=	$\frac{9 \times H_2 \times \{2445 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$
	=	$\frac{9 \times 0.12 \times \{584 + 0.45(190 - 30)\}}{10000} \times 100$
	L2 =	7.08%
g) %การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง	=	$\frac{M \times \{2445 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$
	=	$\frac{0.05 \times \{2445 + 1.88(190 - 31)\}}{41858} \times 100$
	L3 =	0.033%

h) %การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความชื้นในอากาศ =
$$\frac{ASS \times \text{humidity factor} \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$$

=
$$\frac{21.86 \times 0.025 \times 1.88 \times (190 - 31)}{41858} \times 100$$

L4 = 0.38%

i) การสูญเสียเนื่องจากการแผ่ความร้อนและการพาความร้อน (L6) =
$$0.845 \times \left[\left(\frac{T_s}{25.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{25.55} \right)^4 \right] + 1.65 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{(184.89 \times 3.6 + 88.6)}{25.5}}$$

=
$$0.845 \times \left[\left(\frac{398}{25.55} \right)^4 - \left(\frac{303}{25.55} \right)^4 \right] + 1.65 \times (398 - 303)^{1.25} \times \sqrt{\frac{(184.89 \times 3.6 + 88.6)}{25.5}}$$

= 1303 W/m²

= 1303x3.6

= 4690.8 kJ/m² · hr

การสูญเสียความร้อนจากการแผ่ความร้อนและการพาความร้อนทั้งหมดต่อชั่วโมง = 4690.8 x 90 m²

= 422172 kJ/hr

%การสูญเสียของการแผ่ความร้อนและการพาความร้อน =
$$\frac{422172}{41858 \times 2648.125} \times 100$$

L6 = 0.38%

โดยปกติการสูญเสียประเภทนี้จะถูกประมาณที่ 0.5-1.0% เพื่อความง่าย

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม = 100 - (L1+L2+L3+L4+L6)

= 100 - (7.86+7.08+0.033+0.38+0.38)

= 100-15.73

= 84.27%

สรุปข้อมูลสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำแบบเชื้อเพลิงน้ำมันเตา

ตัวแปร (Input/ Output parameter)		kJ/kgของเชื้อเพลิง	%
พลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ	=	41858	100
การสูญเสียประเภทต่างๆ			
1. การสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง	=	3290.04	7.86
2. การสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง	=	2963.55	7.08
3. การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง	=	13.81	0.033
4. การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในอากาศ	=	159.06	0.38
5. การเปลี่ยนจาก C ไปเป็น CO	=	0	0
6. การสูญเสียที่พื้นผิว	=	159.06	0.38
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ = $100 - (L1+L2+L3+L4+L6) = 84.27\%$			

8.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของหม้อไอน้ำ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของหม้อไอน้ำถูกแสดงด้านล่างนี้

- การทำความสะอาดหม้อไอน้ำเป็นระยะๆ
- การเป่าเขม่าค้างทิ้งเป็นระยะๆ
- การบำบัดน้ำที่เหมาะสมและการควบคุมการระบายน้ำออก
- การควบคุมไหลเวียนอากาศ
- การควบคุมอากาศส่วนเกิน
- เฟอร์นิเจอร์การรับภาระของหม้อไอน้ำ
- ความดันและอุณหภูมิในการสร้างไอน้ำ
- จนวนของหม้อไอน้ำ
- คุณภาพของเชื้อเพลิง

8.4.4 รูปแบบการเก็บข้อมูลเพื่อการประเมินความสามารถในการทำงานของหม้อไอน้ำ

แผ่นงานที่ 1. ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อไอน้ำ
- รหัสหม้อไอน้ำและการสร้าง (Boiler ID Code and Make) - ปีที่ทำการสร้าง (Year of Make) - กำลังการผลิตของหม้อไอน้ำ (Boiler Capacity Rating) - ประเภทของหม้อไอน้ำ (Type of Boiler) - ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ (Type of Fuel Used) - อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงสูงสุด (Maximum Fuel Flow Rate) - ประสิทธิภาพแยกตามค่าความร้อนรวม (Efficiency by GCV) - ความดันของไอน้ำและอุณหภูมิของไอน้ำยิ่งยวด (Steam generation pressure & superheat temperature)

9.	พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน (ตารางเมตร) (Heat Transfer Area in m ²)
10.	มีการติดตั้งอุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่หรือไม่ (Is there any waste heat recovery device installed?)
11.	ประเภทของลม (Type of Draft)
12.	ความสูงของปล่องควัน (เมตร) (Chimney Height in Metre)

แผ่นงานที่ 2. รายละเอียดการวิเคราะห์เชื้อเพลิง		
เชื้อเพลิงที่ใช้		
ค่า GCV ของเชื้อเพลิง		
ค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิง (ของเหลว)		
ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (ของแข็ง)		
การวิเคราะห์โดยประมาณ		วันที่ทดสอบ:
1.	ปริมาณคาร์บอน	%
2.	สารระเหย	%
3.	ขี้เถ้า	%
4.	ความชื้น	%
การวิเคราะห์โดยละเอียด		วันที่ทดสอบ:
1.	คาร์บอน	%
2.	ไฮโดรเจน	%
3.	ซัลเฟอร์	%
4.	ไนโตรเจน	%
5.	ขี้เถ้า	%
6.	ความชื้น	%
7.	ออกซิเจน	%
การวิเคราะห์น้ำ		วันที่ทดสอบ:
1.	ปริมาณสารแขวนลอย (TDS) ในน้ำที่ไหลเวียนในระบบ	ppm
2.	ปริมาณสารแขวนลอย (TDS) ในน้ำที่ระบายออก	ppm
3.	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำที่ไหลเวียนในระบบ	
4.	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำที่ระบายออก	

การวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย		วันที่ทดสอบ :
1.	ปริมาณ CO ₂	%
2.	ปริมาณ O ₂	%
3.	ปริมาณ CO	%
4.	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย	°C

แผ่นงานที่ 3. รูปแบบแผ่นงานสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

วันที่:.....

รหัสประจำหม้อไอน้ำ:.....

ลำดับ	เวลา	สภาพแวดล้อม		เชื้อเพลิง		น้ำไหลเวียนเข้าระบบ		ไอน้ำ			การวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย				พื้นผิวของหม้อไอน้ำ
		อุณหภูมิ กระเปาะ แห้ง (°C)	อุณหภูมิ กระเปาะ เปียก (°C)	อัตราการ ไหล (kg/hr)	อุณหภูมิ (°C)	อัตรา การไหล (m ³ /hr)	อุณหภูมิ (°C)	อัตรา การไหล (m ³ /hr)	ความดัน (kg/cm ²)	อุณหภูมิ (°C)	% O ₂	% CO ₂	% CO	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)
1.															
2.															
3.															
4.															
5.															
6.															
7.															
8.															

ผู้ดูแลหม้อไอน้ำ
(Boiler Supervisor)

ผู้จัดการด้านพลังงาน
(Energy Manager)

ผู้ตรวจสอบด้านพลังงาน
(Energy Auditor)

8.5 วิธีการตรวจสอบสภาพหม้อไอน้ำและเกณฑ์การยอมรับ

8.5.1 ตัวหม้อไอน้ำ

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
1. เปลือกและอื่นๆ	a) เปลือก (Shell), ผนังหน้า หลัง (End plate), ปล่องไอเสีย (Flue Gas) และส่วนที่เป็นเหล็กหล่อ (Cast iron section)	ตรวจสอบรอยของการผิดรูป การเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนสูง การรั่วซึมของไอน้ำและน้ำ การผุกร่อนและเขม่าดำที่ช่องมองลอดและหัวเผา	ไม่มีการผิดรูป ความร้อนสูงเกินปกติ สีเปลี่ยน การรั่วซึม การผุกร่อนและเขม่าดำ
	b) ท่อและวาล์ว	ตรวจสอบการหลวมของสลักเกลียว การรั่วซึมของไอน้ำและน้ำ การผุกร่อน	ไม่มีการหลวมของสลักเกลียว ไม่มีการรั่วซึมและการผุกร่อน
2. หลอดน้ำและอื่นๆ	หลอดน้ำ (Water tube), หลอดไฟ (Fire tube) และค้ำยัน (Stay)	ตรวจสอบการบวม ความร้อนสูงเกินปกติเฉพาะที่ การรั่วซึมของไอน้ำและน้ำ การโก่งตัว การผุกร่อนและเขม่าดำตลอดช่องมองลอดและหัวเผา	ไม่มีการบวม ความร้อนสูงเกินปกติเฉพาะที่ ไม่มีการรั่วซึม หรือการโก่งตัวที่สังเกตเห็นได้ ไม่มีการผุกร่อนและเขม่าดำ
3. กรอบ	a) กรอบ (Casing) และวัสดุทนไฟ (Refractory)	i) ตรวจสอบความเสียหาย กลิ่นที่ผิดปกติ การเปลี่ยนสีของสารเคลือบ การหลวมของสลักเกลียว การผุกร่อนและเขม่าดำ ii) ตรวจสอบรอยแตกร้าว โดยการใช้ควันทดสอบ	i) ไม่มีความเสียหาย ไม่มีกลิ่นผิดปกติ ไม่มีการเปลี่ยนสี การหลุดหลวม ไม่มีเขม่าดำ และการผุกร่อนที่สังเกตเห็นได้ ii) ไม่มีความเสียหายและรอยแตกร้าว
	b) ฉนวน (Insulation)	ตรวจสอบความเสียหาย	ไม่มีความเสียหาย
4. ฐานรากและการติดตั้ง	a) สลักเกลียวยึดฐานราก (Foundation bolt)	ตรวจสอบความเสียหาย และการหลวมของสลักเกลียวโดยใช้ค้อน	ไม่มีความเสียหาย และการหลวมของสลักเกลียว
	b) ฐานรากคอนกรีต (Concrete foundation)	i) ตรวจสอบรอยแตกร้าว และการเสื่อมสภาพ ii) ตรวจสอบร่องรอยของน้ำใต้ดิน	i) ไม่มีรอยแตกร้าวและการเสื่อมสภาพ ii) ไม่มีคราบน้ำและการงัดตัวของน้ำใต้ดิน
	c) ตัวหม้อไอน้ำ (Boiler body)	ตรวจสอบการเอียงตัวและการเลื่อนตำแหน่ง	ไม่มีการเอียงตัวและเลื่อนตำแหน่ง

8.5.2 อุปกรณ์การเผาไหม้

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
1. เครื่องให้ความร้อนน้ำมัน	a) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)	i) ตรวจสอบสภาพการทำงาน ii) ตรวจสอบหน้าสัมผัส การลัดวงจร และสภาพฉนวนของหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (Electrical contact)	i) อุณหภูมิของน้ำมันต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ii) หน้าสัมผัสต้องทำงานได้ดี ไม่มีการลัดวงจร หรือการเสื่อมสภาพของฉนวน
	b) วาล์วควบคุม (Control valve) สำหรับการให้ความร้อนไอน้ำ	ตรวจสอบสภาพการทำงาน	ต้องทำงานปกติ
	c) อุปกรณ์ดักไอน้ำ (Steam trap)	ตรวจสอบการการระบายของน้ำ	น้ำควรระบายได้ปกติ
	d) ข้อต่อท่อและวาล์ว	ตรวจสอบการรั่วซึมของไอน้ำหรือน้ำมัน	ไม่มีการรั่วซึมของน้ำและน้ำมัน
2. ปั๊มเชื้อเพลิง	a) ท่อและซีล (Sealing part and pipes)	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำมันเชื้อเพลิง	ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมันเชื้อเพลิง
	b) ประเก็นเชือก (Gland packing)	ตรวจสอบความเสียหายจากความร้อนสูง	ไม่มีความเสียหายจากความร้อนสูง
	c) ดับลูกปืน (Bearing)	ตรวจสอบการสั่นสะเทือน การรั่วซึมของน้ำมัน และความเสียหายจากความร้อนสูง	ไม่มีการสั่นสะเทือน ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมัน ความเสียหายจากความร้อนสูง ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นและคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม
	d) แกนหมุน (Rotor)	ตรวจสอบหาเสียงที่ผิดปกติ และการสั่นสะเทือน	ไม่มีการสั่นสะเทือนและเสียงที่ผิดปกติ
	e) มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)	ตรวจสอบความดันขาออกของปั๊ม	ความดันควรอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
3. หัวเผาและกลไกสร้างละอองน้ำมัน	a) หัวฉีด (Nozzle), ตัวปรับสภาพน้ำมัน (Stabilizer) และถ้วยสร้างละอองน้ำมัน (Atomizing cup)	ตรวจสอบความเสียหายจากการลุกไหม้ การผิดรูป การเสื่อมสภาพและเขม่าดำ	ไม่มีความเสียหายจากการลุกไหม้ การผิดรูป การเสื่อมสภาพและเขม่าดำ
	b) ปลายหัวฉีด (Nozzle tip)	ตรวจสอบความสามารถในการสร้างละอองน้ำมัน	สีและรูปร่างของเปลวไฟควรเหมาะสม

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
	c) ตลับลูกปืนของหัวเผา	ตรวจสอบการสันสะท้อนที่ผิดปกติ การรั่วซึมของน้ำมัน ความร้อนที่สูงผิดปกติ และการหล่อลื่นอุปกรณ์	ไม่มีการสันสะท้อนที่ผิดปกติ ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมัน ความร้อนไม่สูงผิดปกติ มีปริมาณและคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม
	d) กลไกผสมอากาศและน้ำมัน (A/F ration mechanism)	i) ตรวจสอบการสร้างละอองน้ำมันโดยพิจารณาจากสีของเปลวไฟ ii) ประเมินสัดส่วนอากาศและน้ำมันโดยใช้มาตรวัดออกซิเจนหรือควัน	i) สีของเปลวไฟควรปกติ ii) ค่าจากการวัดออกซิเจนและการ์บอนไดออกไซด์ควรอยู่ในเกณฑ์ปกติ
	e) ขั้วไฟฟ้า (Electrode)	i) ตรวจสอบการเปราะเปื้อนเสื่อมสภาพ หรือลูกใหม่ ii) ตรวจสอบตำแหน่งและระยะห่างระหว่างขั้ว iii) ตรวจสอบรอยแตกร้าวของฉนวน iv) ตรวจสอบการเสื่อมสภาพของลวดนำไฟฟ้า และการหลุดหลวมที่จุดเชื่อมต่อ	i) ไม่มีการเสื่อมสภาพ ความเสียหายจากการลูกใหม่ที่เกิดขึ้นได้ ii) ตำแหน่งและระยะห่างควรอยู่ในระยะเหมาะสม iii) ไม่มีความเสียหายหรือรอยแตกร้าว iv) ไม่มีการเสื่อมสภาพของลวดตัวนำและการหลุดหลวมของจุดเชื่อมต่อ
4. กรองน้ำมัน	ตาข่ายกรองน้ำมัน (Wire net)	i) ตรวจสอบความเสียหาย ii) ตรวจสอบการอุดตัน iii) ตรวจสอบระยะห่างระหว่างกรอบตาข่ายและจุดติดตั้ง iv) ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำมัน	i) ไม่มีความเสียหาย ii) ไม่อุดตัน iii) ไม่มีช่องว่าง iv) ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมัน
5. ห้องเผาไหม้และวัสดุทนความร้อน	วัสดุทนไฟและทนความร้อน (Refractory material and burner tile)	ตรวจสอบการผิกรูป การรูกไหม้และเขม่าดำตลอดช่องมองลอดและหัวเผา	ไม่มีการผิกรูป การรูกไหม้และคราบเขม่าดำที่สังเกตได้
6. เครื่องป้อนเชื้อเพลิง	a) เครื่องป้อนเชื้อเพลิง (Stoker)	ตรวจสอบสภาพการเคลื่อนไหวน	ควรเคลื่อนที่ด้วยความนุ่มนวลไม่ติดขัด
	b) ตะแกรง (Fire grate)	ตรวจสอบการอุดตัน การรูกไหม้ และการผิกรูป	ไม่มีการอุดตัน การรูกไหม้ และการผิกรูป

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
7. พัฒนาคูอากาศ	a) ตลับลูกปืน (Bearing)	ตรวจสอบการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติ การรั่วซึมของน้ำมัน ความร้อนที่สูงผิดปกติ และการหล่อลื่นอุปกรณ์	ไม่มีการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติ ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมัน ความร้อนไม่สูงผิดปกติ มีปริมาณและคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม
	b) ใบพัดและแผ่นปิดช่องลม (Vane and damper)	ตรวจสอบสภาพการทำงาน	ทำงานได้อย่างไม่ติดขัด การเปิดปิดเป็นปกติ
	c) ท่ออากาศและท่อลมใหญ่ (Air duct and wind box)	ตรวจสอบความผิดปกติ การรั่วซึมของอากาศ และคราบน้ำมัน	ไม่มีความผิดปกติที่สังเกตได้และการรั่วซึมของอากาศหรือคราบน้ำมัน
	d) ตาข่ายและช่องลมดูด (Wire net and suction port)	ตรวจสอบความเสียหายและการยึดเกาะของสิ่งแปลกปลอม	ไม่มีความเสียหายและการยึดเกาะของสิ่งแปลกปลอม
8. ท่อก๊าซและปล่องควัน	a) ผิวภายนอกและภายใน	i) ตรวจสอบการผิดปกติของสี ii) ตรวจสอบความเสียหาย การผุกร่อนและรอยแตกร้าว iii) ตรวจสอบเขม่าดำ ไขมัน คราบน้ำ และการผุกร่อน iv) ตรวจสอบการรั่วซึมของก๊าซ การไหลเข้าของอากาศ โดยใช้มาตรวัดลม (draft gauge) และมาตรวัดควัน	i) ไม่มีความผิดปกติของสี ii) ไม่มีความเสียหายที่สังเกตได้ ไม่มีการผุกร่อนและรอยแตกร้าว iii) ไม่มีเขม่าดำและไขมัน ไม่มีคราบน้ำและการผุกร่อน iv) อากาศไหลผ่านอย่างเหมาะสม ไม่มีการรั่วซึมของก๊าซและการเข้ามาปะปนของอากาศภายนอก
	b) อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Lightning rod)	ตรวจสอบการหลุดหรือขาดของลวดตัวนำ และการทำงานของสายดิน	ลวดตัวนำไม่ขาดและสายดินอยู่ในสภาพสมบูรณ์
	c) ฐานราก (Foundation)	ตรวจสอบการทรุดตัวและการแตกร้าว	ไม่มีการทรุดตัวและการแตกร้าว
9. ประตูลดแรงระเบิด (Explosion door)	a) แผ่นปิดและโครง (Plate and frame)	i) ตรวจสอบการผิดรูป การลูกไหม้ ii) ตรวจสอบการรั่วซึมของก๊าซ	i) ไม่มีการผิดรูป การลูกไหม้ และการทำงานเป็นปกติ ii) ไม่มีการรั่วซึมของก๊าซ
	b) สปริง	ตรวจสอบการชำรุด สนิม และความบกพร่องอื่นๆ	ไม่มีการชำรุดบกพร่องหรือคราสนิมที่สามารถสังเกตเห็นได้
10. ถังน้ำมัน	a) ผิวภายนอกและภายใน	ตรวจสอบการแตกร้าวและการผุกร่อน	ไม่มีการแตกร้าวและการผุกร่อนที่สังเกตได้

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
เชื้อเพลิง	b) ข้อต่อของท่อและวาล์ว	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำมันเชื้อเพลิง	ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมันเชื้อเพลิง
	c) ส่วนล่างของถัง (Bottom part)	ตรวจสอบการสะสมตัวของคราบตะกอน	ไม่มีคราบตะกอนมีสังเกตเห็นได้
	d) ฐานราก (Foundation)	ตรวจสอบการทรุดตัวและรอยแตกร้าว	ไม่มีการทรุดตัวและรอยแตกร้าว
	e) ตัวควบคุมปริมาณน้ำมัน (Oil level controller)	i) ตรวจสอบการทำงานของสวิตช์ลูกลอย ii) ตรวจสอบความเสียหายที่ตัวลูกลอย iii) ตรวจสอบการแตกร้าวของลูกยางขุ่น (Bellow) และการรั่วซึมของน้ำมัน	i) สวิตช์ทำงานได้ปกติ ii) ลูกลอยไม่เสียหายและเคลื่อนที่ได้ปกติ iii) ไม่มีการแตกร้าวที่ลูกยางขุ่น และการรั่วซึมของน้ำมัน
	f) มาตรวัดระดับน้ำมัน (Oil level gauge)	ตรวจสอบการทำงาน	ต้องทำงานได้ปกติ

8.5.3. อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
1. แผงควบคุม	a) ชิ้นส่วน (Parts)	i) ตรวจสอบสภาพ ii) ตรวจสอบความผิดปกติของความร้อนและกลิ่น	i) ไม่มีการหลุดหลวม ii) ไม่มีความผิดปกติของความร้อนและกลิ่น
	b) จุดเชื่อมต่อสายไฟ (Terminal)	ตรวจสอบการผิดปกติของสีเนื่องจากความร้อนสูง สนิม และการความสกปรก	ไม่มีการผิดปกติของสี การเปราะเปื้อนหรือคราบสนิมที่สังเกตเห็นได้
2. อุปกรณ์เริ่มและหยุดทำงาน	ระบบเริ่มและหยุดการทำงานของเครื่อง	ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาที่ใช้ในการจุดไฟ หรือการทดสอบเครื่อง	เวลาต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. ตัวควบคุมด้านความปลอดภัยเบื้องต้น	a) กรอบและฝาปิด (Case and cover)	ตรวจสอบความผิดปกติของความร้อนโดยไม่สัมผัสด้วยมือโดยตรง	ความร้อนต้องอยู่ในเกณฑ์ปกติ

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
	b) ขั้วสายไฟที่จุดเชื่อมต่อ	i) ตรวจสอบการหลุดหลวมของตะปูควง ii) ตรวจสอบการประอะเปื้อนและคราบสนิม	i) ไม่มีการหลุดหลวมของตะปูควง ii) ไม่มีการประอะเปื้อนและคราบสนิม
	c) ระบบตัดเชื้อเพลิงเมื่อมีความผิดปกติที่เปลวไฟ	ตรวจสอบการทำงานของระบบ โดยปิดวาล์วเชื้อเพลิงด้วยมือระหว่างการเผาไหม้	ต้องมั่นใจว่าเมื่อวาล์วเชื้อเพลิงถูกปิด สัญญาณเตือนภัยเมื่อมีความผิดปกติที่เปลวไฟต้องร้องเตือน
4. อุปกรณ์ตรวจสอบเปลวไฟ	a) กระจกป้องกัน (Protect and shielding glass)	ตรวจสอบการประอะเปื้อนและรอยแตกร้าว	ไม่มีการประอะเปื้อนและรอยแตกร้าว
	b) หลอด UV (Ultra violet photo-electric tube) และแท่งตรวจสอบเปลวไฟ (Flame rod)	ตรวจสอบค่าความต้านทานความเป็นฉนวนของจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้า ถอดเครื่องตรวจจับเปลวไฟ (Flame detector) และอุปกรณ์ควบคุมด้านความปลอดภัยเบื้องต้น (Primary safety controller) ออกถ้าจำเป็น	ต้องมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด
5. อุปกรณ์ตัดเชื้อเพลิง	5.i โซลิโนอยด์วาล์ว	a) ขดลวด (Coil)	ตรวจสอบความผิดปกติของความร้อน กลิ่น เสียง และการสั่นสะเทือน
		b) วาล์ว	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำมัน ผ่านบ่าวาล์ว ประเก็นและหน้าแปลน
		c) กลไกการตัดเชื้อเพลิง	ตรวจสอบสภาพการทำงาน
	5.ii วาล์วมอเตอร์และน้ำมัน	a) ดันแรง (Driving source)	ตรวจสอบความผิดปกติของอุณหภูมิ กลิ่น และการรั่วซึมของน้ำมันดันกำลัง
		b) วาล์วและประเก็น	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำมัน ผ่านบ่าวาล์ว ประเก็นและหน้าแปลน

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ			วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
			ประกันและหน้าแปลน	ผ่านประกันและหน้าแปลน
		c) การติดตั้ง (Fixing)	ตรวจสอบลักษณะการติดตั้ง	ต้องไม่มีการเอนเอียงที่สังเกตได้
		d) กลไกการตัดเชื้อเพลิง	ตรวจสอบสภาพการทำงาน	ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ตำแหน่งการเปิดปิดต้องอยู่ในเกณฑ์ปกติ
6. วาล์วควบคุมระดับน้ำ เครื่องตรวจจับระดับน้ำ (แบบลูกลอย แบบขั้วไฟฟ้า และแบบความต่างของความดัน)	a) ท่อเชื่อมต่อและท่อระบาย	ตรวจสอบการอุดตัน การรั่วซึมของน้ำและไอน้ำ	ไม่มีการอุดตัน หรือรั่วซึม	
	b) วาล์วหรือท่อเชื่อมต่อ	ตรวจสอบว่าเปิดหรือปิด	ต้องถูกเปิดอย่างเต็มที่	
	c) ชิ้นส่วนอื่น	ตรวจสอบว่ามีการหลุดหลวมหลังการติดตั้ง	ต้องไม่มีการหลุดหลวม	
	d) จุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้า	i) ตรวจสอบการหลุดหลวมของตะปูควง ii) ตรวจสอบฝุ่น ความชื้น คราบสนิม และการผุกร่อน	i) ไม่มีการหลุดหลวม ii) ไม่มีฝุ่น ความชื้น คราบสนิม และการผุกร่อน	

8.5.4 อุปกรณ์ต่อพ่วงและเครื่องประกอบ

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
1. เครื่องทวิความร้อน (Super heater)	หลอดเครื่องทวิความร้อนและเฮดเดอร์	i) ตรวจสอบการโก่งตัว ความผิดปกติของสี การบวมตัว รอยแตกร้าว การรั่วซึมของไอน้ำ การผุกร่อน และการเปราะเปื้อน ii) ตรวจสอบอุณหภูมิของไอน้ำ ความร้อนยิ่งยวด (Superheated steam)	i) ไม่มีการโก่งตัว ความผิดปกติของสี การบวมตัว รอยแตกร้าว การรั่วซึมของไอน้ำ การผุกร่อน และการเปราะเปื้อน ii) ต้องมีอุณหภูมิอยู่ในเกณฑ์ปกติ
2. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Economizer)	หลอดและส่วนอื่นๆ	i) ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำ รอยแตกร้าว ความเสียหาย การผุกร่อน และการเปราะเปื้อน ii) ตรวจสอบความ	i) ไม่มีการรั่วซึมของน้ำ รอยแตกร้าว ความเสียหาย การผุกร่อนและการเปราะเปื้อนที่สังเกตได้

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
		แตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขาเข้าและขาออก	
3. เครื่องอุ่นอากาศ (Air preheater)	3.i เครื่องอุ่นอากาศแบบหลายหลอด	i) ตรวจสอบการรั่วซึมของอากาศ รอยแตก ร้าว การ อุดตัน การผุกร่อน และการเปราะเปื้อน ii) ตรวจสอบความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขาเข้าและขาออก iii) ตรวจสอบความแตกต่างของความดันก๊าซไอเสียระหว่างขาเข้าและขาออก	i) ไม่มีการรั่วซึมของอากาศ รอยแตก ร้าว การ อุดตัน การผุกร่อน และการเปราะเปื้อน ii) ความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ในเกณฑ์ปกติ iii) ความแตกต่างของความดันอยู่ในเกณฑ์ปกติ
	3.ii เครื่องอุ่นอากาศแบบโรตารี (Regenerative air-preheater)	a) แกนหมุน (Rotor)	ตรวจสอบการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติ รอยแตก ร้าว การหยุดชะงัก ความเสียหาย การอุดตัน การผุกร่อน และการเปราะเปื้อน
		b) ลูกปืน (Bearing)	ตรวจสอบความผิดปกติของความร้อน การรั่วซึมของน้ำมันหล่อลื่น
		c) มอเตอร์ขับ (Driving motor)	ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของภาระที่เปลี่ยนแปลงของภาระ (Load)
		d) ชิ้นส่วน (Element)	ตรวจสอบการเปราะเปื้อน การผุกร่อน และการเสื่อมสภาพ
		e) ซีล (Sealing part)	ตรวจสอบระยะของซีลและชิ้นส่วนอยู่ในเกณฑ์ปกติ และไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น
4. ปั๊มน้ำเลี้ยง (Feed water pump)	a) ชุดใบพัด (Rotor)	ตรวจสอบความผิดปกติของเสียงและการสั่นสะเทือน	ไม่มีความผิดปกติของเสียงและการสั่นสะเทือน

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
		สันสะท้อน	
	b) ประเก็น (Gland)	i) ถ้าเป็นซิลทางกล ต้องตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำ หรือความผิดปกติของอุณหภูมิที่สูง ii) ถ้าเป็นประเก็นเชือก ต้องตรวจสอบความผิดปกติของอุณหภูมิที่สูง และการทำงานของซิล	i) ไม่มีการรั่วซึมและความร้อนสูงผิดปกติ ii) ไม่มีความร้อนสูงผิดปกติ การมีน้ำและ ส่วนขอบที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ซิลแน่นเป็นสิ่งจำเป็น
	c) ตลับลูกปืน (Bearing)	ตรวจสอบการสันสะท้อนที่ผิดปกติ การรั่วซึมของน้ำมัน ความร้อนที่ผิดปกติ และสภาพการหล่อลื่น	ไม่มีการสันสะท้อนที่ผิดปกติ ไม่มีการรั่วซึมของน้ำมัน ไม่มีความร้อนสูงปริมาณและคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นอยู่ในเกณฑ์เหมาะสม
	d) ก้านเพลลา (Shaft)	ตรวจสอบการเยื้องศูนย์ (Eccentricity) และหนีศูนย์ (Run out)	ไม่มีการเยื้องศูนย์และหนีศูนย์
5. ถังน้ำเลี้ยง (Feed water tank)	a) มาตรวัดระดับน้ำ	ตรวจสอบความผิดปกติของตัวบ่งชี้	ต้องอยู่ในสภาพปกติ
	b) ตัวบ่งชี้ระดับน้ำต่ำสุด	ตรวจสอบความผิดปกติของการบ่งชี้ และระบบแจ้งเตือน	ต้องอยู่ในสภาพปกติ
	c) ตัววัดอุณหภูมิ	ตรวจสอบอุณหภูมิน้ำเข้าระบบ	ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	d) ตัวถัง	i) ตรวจสอบการรั่วซึม การผุกร่อนทั้งภายในและภายนอกถัง ii) ตรวจสอบการเปราะเปื้อนและสิ่งตกค้าง เช่น ทรายและโคลน	i) ไม่มีการรั่วซึมของน้ำและการผุกร่อนที่สังเกตได้ ii) ไม่มีการเปราะเปื้อนและสิ่งตกค้างที่สังเกตได้
	e) ระบบท่อ (Piping)	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำ และการผุกร่อน	ไม่มีการรั่วซึมของน้ำ และการผุกร่อนที่สังเกตได้
	f) อุปกรณ์ควบคุม	ตรวจสอบสภาพการ	ต้องทำงานได้ปกติ ไม่มีการขัดข้อง

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
	ระดับน้ำ	ทำงาน	
6. วาล์วนิรภัย วาล์วควบคุมความดัน (Safety valve) และ ท่อระบายน้ำ	a) วาล์ว	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำและไอน้ำ	ไม่มีการรั่วซึม
	b) สปริง	ตรวจสอบการแตกหัก กราบสนิม และการเปราะเปื้อน	ไม่มีการแตกหัก กราบสนิมและรอยเปราะที่สังเกตได้
	c) ชิ้นส่วนที่อยู่กับที่	ตรวจสอบการรั่วซึมของไอน้ำและน้ำ การหลุดหลวมของตะปู กวกราบสนิม และการเปราะเปื้อน	ไม่มีการรั่วซึม การหลุดหลวม กราบสนิมและรอยเปราะที่สังเกตได้
	d) ท่อระบายไอ	ตรวจสอบการอุดตัน การผุกร่อน และการติดตั้ง	ไม่มีการอุดตันและการผุกร่อน ความอ่อนตัวของท่อเป็นสิ่งจำเป็น
	e) ท่อระบายน้ำ	ตรวจสอบสภาพของฉนวนความร้อน การรั่วซึมของน้ำและการอุดตัน	ไม่มีน้ำหยด หรือความเสียหายที่ฉนวน ความร้อน ไม่มีการรั่วซึมของน้ำ ไม่มีการอุดตันของท่อ

8.5.5 อุปกรณ์อื่นๆ

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
1. ระบบท่อ	1.i ระบบท่อ	a) ท่อ	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำและไอน้ำ ความเสียหาย การบิดตัว และการผุกร่อน
		b) ข้อต่อขยาย (Expansion joint) และฐานรองท่อ (Pipe supporter)	ไม่มีความเสียหาย และสามารถขยายตัวได้อย่างอิสระ
		c) กับดักไอน้ำ (Steam trap)	ตรวจสอบว่าน้ำได้ถูกระบายออกได้ดี
		d) ฉนวนความร้อนและแผ่นปิด	ตรวจสอบ ร่องรอย ความเสียหาย
		e) ระบบท่อภายนอก	ตรวจสอบว่าท่อถูกแช่ ท่อต้องไม่ถูกแช่อยู่ในน้ำ

อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ		วิธีการตรวจสอบ		เกณฑ์การยอมรับ
		อาคารและใต้ดิน	อยู่ในน้ำหรือไม่	
	1.ii วาล์วและหน้าแปลน	ประเก็นและหน้าแปลน	ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำและไอน้ำ การหลุดหลวมและความเสียหายของสลักเกลียว	ไม่มีการรั่วซึมและการหลุดหลวมของสลักเกลียว
2. เครื่องเป่าเขม่า(Soot blower)		แกนเพลลาและหัวฉีด	ตรวจสอบการโก่งตัว การลุกลไหม้ และสภาพการทำงาน	ไม่มีการโก่งตัว การลุกลไหม้ และมีสภาพการทำงานที่สมบูรณ์
3. อุปกรณ์ตรวจสอบควันไอเสีย	a) ส่วนตรวจจับ (Detecting part)		ตรวจสอบการเปราะเปื้อน และการเสื่อมสภาพของหลอดแก้ว	ไม่มีการเปราะเปื้อน และการเสื่อมสภาพของหลอดแก้ว
	b) ส่วนตรวจวัด (Measuring part)		ตรวจสอบสภาพการทำงาน	อุปกรณ์ต้องทำงานได้ตามปกติ

8.6 แนวทางการตรวจสอบหม้อไอน้ำประจำปี

การตรวจประจำปีหมายถึง การตรวจสอบในเรื่องของ การผิดรูป การเสียหายของชิ้นส่วนและอื่นๆ ภายในหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดัน การตรวจสอบนี้รวมถึงตัวเครื่อง อุปกรณ์เผาไหม้ ระบบควบคุมอัตโนมัติ และอุปกรณ์ต่อพ่วงการตรวจสอบประจำปีนี้เพื่อตรวจหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันในทุกๆปี เพื่อดูว่าอุปกรณ์เหล่านั้นยังอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์หรือไม่ การตรวจการทำงานของเครื่องมือต่างๆควรทำเป็นระยะๆโดยเจ้าหน้าที่คุมเครื่อง

8.6.1 หน้าที่ของผู้ตรวจสอบ

- 8.6.1.1 เมื่อผู้ตรวจสอบทำการตรวจสอบประจำปี ผู้ตรวจสอบควรรู้ข้อมูลเกี่ยวกับหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันล่วงหน้าโดยการตรวจสอบบัญชีแยกประเภทของหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดัน
- 8.6.1.2 ก่อนทำการตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบต้องรู้สภาพการทำงาน การบำบัดน้ำ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันผ่านการอธิบายจากเจ้าหน้าที่คุมเครื่อง หรือโดยการตรวจสอบบันทึกการตรวจสอบเครื่องที่ถูกจัดทำเป็นระยะๆ
- 8.6.1.3 ผู้ตรวจสอบต้องร้องขอให้เจ้าของเครื่องเข้าร่วมการตรวจสอบ เพื่อที่จะทำหน้าที่คอยช่วยให้การตรวจสอบนั้นเสร็จสิ้น
- 8.6.1.4 ผู้ตรวจสอบต้องใช้อุปกรณ์ช่วยในการตรวจสอบ เช่น ค้อน กระจก เครื่องมือวัด ชอล์ก สมุดจด และอื่นๆ ผู้ตรวจสอบต้องระบุตำแหน่งของชิ้นส่วนที่สมควรได้รับการซ่อมบำรุงด้วยชอล์กเพื่อให้เจ้าของเห็นได้อย่างชัดเจน และเพื่อให้ผู้ตรวจสอบสามารถจดบันทึกเกี่ยวกับจุดบกพร่องของเครื่องลงในสมุดจดได้อย่างง่ายดาย
- 8.6.1.5 ผู้ตรวจสอบต้องสวมหมวกนิรภัย รองเท้านิรภัย เข็มขัดนิรภัย และอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆที่จำเป็นตามข้อกำหนดของพื้นที่ทำงาน

- 8.6.1.6 ผู้ตรวจสอบต้องมั่นใจว่า ไฟฉาย สายไฟ หรือข้อต่อที่ถูกใช้ในการตรวจสอบมีโครงสร้างที่ปลอดภัย เพื่อป้องกันการถูกไฟฟ้าดูด
- 8.6.1.7 ผู้ตรวจสอบต้องแน่ใจว่า สำหรับการวัดที่จำเป็น การสร้างนั่งร้านหรืออื่นๆที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่เหมาะสมควรทำเพื่อป้องกันการตกจากที่สูงระหว่างการตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบควรตรวจสอบความมั่นคง และโครงสร้างที่ปลอดภัยของบันไดพาด หรือบันไดพับ
- 8.6.1.8 ผู้ตรวจสอบต้องมั่นใจว่า มีการระบายอากาศที่เพียงพอสำหรับการทำความสะอาดภายในหม้อไอน้ำ และภาชนะรับความดัน
- 8.6.1.9 ผู้ตรวจสอบควรตรวจวัดเชิงป้องกันเพื่อที่จะไม่เปิดหรือปิดวาล์ว ก๊อก หรือแผ่นปิดของหม้อไอน้ำ หรือภาชนะรับความดันอย่างไม่ตั้งใจ
- 8.6.1.10 ผู้ตรวจสอบต้องให้ความสำคัญกับความผิดปกติบนผิวของหม้อไอน้ำหรือภาชนะรับความดัน ผู้ตรวจสอบควรทำการตรวจสอบเพื่อให้ความผิดปกติเหล่านี้ไม่ถูกมองข้าม:
- 8.6.1.11 ผู้ตรวจสอบควรให้เจ้าของเครื่องตรวจทานจุดบกพร่องที่ถูกตรวจพบ ซึ่งการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสภาพของเครื่องนั้นขึ้นอยู่กับผู้ตรวจสอบ

8.6.2 ขอบเขตและวิธีการตรวจสอบประจำปี

8.6.2.1 การตรวจสอบ (Inspection)

จุดต่างๆที่ถูกจัดให้เป็นจุดสำหรับการตรวจสอบต้องถูกตรวจสอบ และผู้ตรวจสอบต้องให้ความเห็นเกี่ยวกับสภาพการทำงานของแต่ละชิ้นส่วน ในกรณีที่มีสภาพการทำงานที่ไม่ปกติ ผู้ตรวจสอบควรแนะนำวิธีแก้ไขให้แก่เจ้าของเครื่อง

8.6.2.2 คำแนะนำ (Advice)

ผู้ตรวจสอบต้องสามารถอธิบายและให้คำแนะนำเชิงเทคนิคเกี่ยวกับจุดตรวจสอบ ซึ่งอาจต้องการการปรับปรุง การซ่อมแซม การเปลี่ยนใหม่ ผู้ตรวจสอบอาจจะละเว้นการให้ความเห็นส่วนตัวในบางกรณี ยกเว้นเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้มีอำนาจตรวจสอบต้องชี้แจง

8.6.2.3 การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)

การตรวจสอบด้วยสายตา หมายถึง งานที่ต้องการการตรวจสอบจุดบกพร่องในหม้อไอน้ำโดยการใช้สายตา และโดยการใช้ เกจวัดความลึก การตีเคาะ และการตรวจสอบการเจาะทะลุเป็นบางครั้ง

8.6.2.4 การทวนสอบ (Verification)

การทวนสอบ หมายถึง การตรวจสอบในเรื่องเกี่ยวกับการจัดการหม้อไอน้ำและการปฏิบัติตามกฎระเบียบ

8.6.2.5 สภาพผิวภายนอก (Outside Surface)

ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบพื้นผิวภายนอกของหม้อไอน้ำดังรายการต่อไปนี้

- (ก) ผลลัพธ์ที่ได้ตามคุณภาพเชื้อเพลิง
- (ข) การเกิดขึ้นของอัตราการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ (Biased Flow) และการการส่งผ่านเปลวไฟ (Flame by-pass)
- (ค) การเสื่อมสภาพของผนังเตาเผาและท่อไอเสีย

(ง) การเกาะติดของเขม่าดำ จี๊ไฉ่ ดินทรายภายในเตาเผาและท่อไอเสีย

8.6.2.6 รอยแตกร้าว (Cracks)

ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบรอยแตกร้าวของหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันโดยที่ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบรอยแตกร้าวจาก

- (ก) ชิ้นส่วนที่รูปร่างเปลี่ยนไป
- (ข) ชิ้นส่วนที่มีการขีดตัวไม่สม่ำเสมอ
- (ค) ชิ้นส่วนที่มีการผิกรูปร่างเนื่องจากความร้อน

8.6.2.7 การผุกร่อน (Corrosion)

ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบการผุกร่อนของหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันโดยที่

- (ก) ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบการผุกร่อนที่ชิ้นส่วนต่อไปนี้
 1. บริเวณที่มีระดับน้ำ
 2. บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำทั้งด้านน้ำและด้านก๊าซ
 3. ชิ้นส่วนที่มีการรั่วซึมเกิดขึ้นแล้ว
- (ข) ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบการกัดเซาะของชิ้นส่วนต่อไปนี้
 1. บริเวณที่สัดส่วนก่อนข้างกลมของหน้าแปลนของแผ่นปิดหัว (Head Plate) หรือปล่องไฟ (Flue)
 2. บริเวณเหล็กโค้งที่ติดกับแผ่นค้ำจุน (Stay) โดยเฉพาะบริเวณมุม
 3. ตามแนวชิ้นส่วนที่มีการเสริมแรงและช่องลอด (Manhole)
 4. ตามแนวชิ้นส่วนที่มีจุดเชื่อมแบบตัวที (T-type Joint)
 5. ในกรณีที่สงสัยว่าจะมีการผุกร่อนบนชิ้นส่วนที่ถูกปิดโดยวัสดุทนไฟ (Refractory) และกรอบ (Casing) ต้องตรวจทานการผุกร่อนภายหลังการถอดวัสดุทนไฟและกรอบออก

8.6.2.8 การรั่วซึม (Leakage)

ผู้ตรวจสอบต้องตรวจสอบการรั่วซึมของหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันโดยที่

- (ก) สำหรับหม้อไอน้ำที่ปล่องควัน ห้องเผาไหม้ และส่วนอื่นๆได้มีการเปลี่ยนรูปไป ต้องตรวจสอบการรั่วซึมโดยการใช้การทดสอบด้วยความดันน้ำ (Hydrostatic test) แต่อย่างไรก็ตามนี้ไม่จำเป็นหากการรั่วซึมสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน
- (ข) ผู้ตรวจสอบควรตรวจสอบร่องรอยการรั่วซึมของชิ้นส่วนต่อไปนี้ด้วยตา
 1. ข้อต่อ (Joint)
 2. รู (Hole)
 3. อุปกรณ์ต่อพ่วงกับท่อ (Tube Attachment)
 4. ถ้ามีการรั่วซึม ต้องตรวจสอบการผุกร่อนในชิ้นส่วนใกล้เคียงซึ่งได้รับผลกระทบจากการรั่วซึม ในกรณีนี้ จนวนความร้อนและอุปกรณ์อื่นจะถูกถอดออกก่อนการตรวจสอบ

8.6.2.9 การลอกเป็นเกล็ด บวมพอง การลอกหลุด (Lamination, Blister and Peeling)

สำหรับชิ้นส่วนของหม้อไอน้ำและภาชนะรับความดันนั้น มีความเป็นไปได้ที่อาจได้รับความร้อนสูง ดังนั้นต้องตรวจสอบหาการลอกเป็นเกล็ด บวมพอง การลอกหลุด

8.6.2.10 รายการที่ต้องตรวจสอบแยกสำหรับปล่องควัน (Flue) และท่อไฟ (Fire Tube) ของหม้อไอน้ำ

(ก) ด้านน้ำ (Water Side)

1. ตะกรันบนปล่องควัน (Flue) แผ่นผนัง (Tube Plate) ท่อไฟ (Fire Tube) และอื่นๆ พร้อมทั้งตรวจสอบความหนาของตะกรัน
2. การเกิดหลุมบนปล่องควัน (Flue) แผ่นผนัง (Tube Plate) ท่อไฟ (Fire Tube) และอื่นๆ พร้อมทั้งตรวจสอบความลึกของหลุม
3. การกัดเซาะและความร้อนสูงที่ปลายทั้งสองของปล่องควัน
4. โคลนที่ด้านล่างของเปลือกหม้อ
5. การทดสอบด้วยก้อนที่แผ่นค้ำจุน (Stay) ทั้งหมดยกเว้นที่ท่อไฟ
6. การผิครูปและการกัดเซาะที่อุปกรณ์ที่ติดกับแผ่นค้ำจุน
7. รอยแตกร้าวของท่อน้ำเลี้ยง (Feedwater Pipe)
8. การบวมของชิ้นส่วนที่โค้งงอของท่อน้ำเลี้ยง (Feedwater Pipe)
9. การรั่วซึมที่ช่องลอด การทำความสะอาดและตรวจสอบช่องลอด
10. การอุดตันในรูขนาดเล็กของท่อเชื่อมต่อในระบบ
11. การหลุดหลอดและการอุดตันของตัวแยกน้ำทิ้ง (Drain Separator)
12. สภาพของจุกที่หลอมละลายได้ (Fusible Plug)
13. ในกรณีที่หม้อไอน้ำใช้แผ่นค้ำจุนแบบเชื่อมติด ต้องตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นส่วนตามแนวรอยเชื่อม

(ข) ด้านไฟ (Fire Side)

1. รอยแตกร้าว การหลุดหลวม และการรั่วซึมบนอุปกรณ์เชื่อมต่อตัวของท่อไฟ และหลอดค้ำยัน (Stay Tube)
2. การอุดตันและโค้งตัวของท่อไฟและหลอดค้ำยัน
3. การผิครูป การพองตัวของปล่องควัน (Flue) เนื่องจากน้ำน้อย
4. ความร้อนสูง หรือการลุกไหม้ที่ด้านหน้าของปล่องควัน และที่จุดติดตั้งของแผ่นปิดหลอดด้านหน้าไปจนถึงปล่องควัน
5. ความร้อนสูงเนื่องจากตะกรันมากที่ฝั่งน้ำ (Water Side)
6. ความเสียหายที่แผ่นแยก (Separation Plate) ที่ด้านหลังห้องควัน (Smoke Box)
7. การทำงานของประตูระบายความดัน (Explosion Door)
8. การรั่วซึมของก๊าซที่ห้องควันและฝาครอบ

8.6.2.11 รายการที่ต้องตรวจสอบแยกสำหรับหม้อไอน้ำแบบแบ่งส่วนเป็นเหล็กหล่อ (Sectional Cast Iron Boiler)

- (ก) ในกรณีที่น้ำเข้าระบบจำนวนมากไม่ได้ถูกบำบัด ต้องตรวจสอบคราบตะกรันทางฝั่งน้ำ (Water Side) หลังจากทีถอดตัวระบาย วาล์วนิรภัย ท่อน้ำเข้าระบบ และอุปกรณ์อื่นๆ ออก

(ข) ทำการทดสอบด้วยความดันน้ำ (Hydrostatic Test) และตรวจสอบการรั่วซึมของชิ้นต่อไปนี้อย่างระมัดระวังระหว่างการทดสอบความดัน

1. ชิ้นส่วนด้านล่างของบริเวณด้านหลังของห้องเผาไหม้
2. ชิ้นส่วนด้านล่างและรอบๆหัวเผาภายในส่วนหน้าของห้องเผาไหม้
3. ชิ้นส่วนด้านบนและระดับกลางในห้องเผาไหม้
4. ชิ้นส่วนในแนวตั้งภายในส่วนกลางทางฝั่งห้องหม้อไอน้ำ
5. อุปกรณ์เชื่อมต่อกับข้อต่อเกลียวนอก (Nipple) ในแต่ละส่วน
6. ฐานรับน้ำหนัก (Bracket) ที่ยึดด้วยสลักเกลียว
7. ตรวจสอบการเคลื่อนไหวของตัวหม้อไอน้ำบนฐานรองรับ
8. ถ้าผู้ตรวจสอบตรวจพบการรั่วซึมจากข้อต่อเกลียวนอก ผู้ตรวจสอบต้องยืนยันว่าส่วนของเครื่องนั้นมีรอยแตกหรือไหม้ภายหลังการถอดออกมาตรวจสอบ

8.6.2.12 รายการที่ต้องตรวจสอบแยกสำหรับหม้อไอน้ำแบบทรงตั้ง (Vertical Boiler)

- (ก) ตรวจสอบการหลุดหลวม การแตกร้าว การรั่วซึมของข้อต่อของห้องเผาไหม้ และส่วนยึดติดของแผ่นค้ำจุน (Stay)
- (ข) ตรวจสอบรอยฉีกขาดที่สลักเกลียวของแผ่นค้ำจุน
- (ค) ตรวจสอบการผิดรูปของห้องเผาไหม้
- (ง) ตรวจสอบรายการต่อไปนี้ที่ด้านล่างของส่วนน้ำเลี้ยง (Water Leg) ของห้องเผาไหม้
 1. คราบสิ่งตกค้าง
 2. การผุกร่อนและการกัดเซาะบนชิ้นส่วนที่โค้งงอ
 3. ความเสียหายของฉนวนทนไฟ
- (จ) ตรวจสอบการรั่วซึมที่แผ่นปิดด้านบน (Crown Plate) ที่ซึ่งปล่องควันทะลุผ่าน และตรวจสอบความร้อนสูง การผุกร่อนที่ท่อน้ำใกล้เคียง
- (ฉ) ตรวจสอบความร้อนสูงของชิ้นส่วนที่สัมผัสกับไอน้ำ และตรวจสอบการรั่วซึมของอุปกรณ์ที่ต่อเชื่อมกับหลอดน้ำซึ่งอยู่บนแผ่นปิดหลอดด้านบน (Upper Tube Plate) ที่ใช้สำหรับแผ่นค้ำจุนของหลอด (Tube Stay) หรือท่อควัน (Smoke Tube) ของหม้อไอน้ำทรงตั้ง
- (ช) ตรวจสอบรอยแตกร้าวเนื่องจากความร้อนสูง และคราบสิ่งตกค้างในส่วนน้ำแคบ (Narrow Water Portion) ลงไปจนถึงรูไฟ (Fire Hole)
- (ซ) ตรวจสอบความร้อนสูงผิดปกติของหลอดน้ำ (Water Tube) และหลอดขวาง (Cross-tube) ในห้องเผาไหม้

8.6.2.13 รายการที่ต้องตรวจสอบแยกสำหรับหม้อไอน้ำแบบหลอดน้ำ (Water Tube Boiler)

- (ก) ตรวจสอบการเปราะจากการกัดด้วยด่าง (Caustic Embrittlement, Alkaline Corrosion) ที่บริเวณจุดต่อดัวยหมุดเหล็ก (Rivet)
- (ข) ตรวจสอบรอยแตกร้าวที่รอยเชื่อมของท่อเชื่อมต่อนาดสั้น (Stub Tube)
- (ค) ตรวจสอบการกัดเซาะที่มุมภายในของเฮดเดอร์ (Header)

- (ง) ตรวจสอบความร้อนสูงผิดปกติ การบวมพอง และการผิดรูปของหลอดน้ำ
- (จ) ตรวจสอบการผุกร่อนที่สำคัญของหลอดน้ำในถัง (Drum) หรือเฮดเดอร์
- (ฉ) ตรวจสอบร่องรอยการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนดังต่อไปนี้
 1. ที่หลอดน้ำซึ่งมีผลกระทบมาจากไอน้ำจากอุปกรณ์เป่าเขม่าดำ (Soot Blower)
 2. ที่หลอดน้ำที่ซึ่งเครื่องทำความสะอาดหลอด (Tube cleaner) ทำงานมาเป็นเวลานาน
 3. ที่หลอดน้ำที่ซึ่งขี้เถ้าและละอองถ่านหินถูกเป่าด้วยลมแรง
 4. ตรวจสอบการรั่วซึมที่รูตรวจสอบ (Inspection Hole) ของเฮดเดอร์
- (ช) ในกรณีที่มีการรั่วซึมที่อุปกรณ์ต่อพ่วงของหลอดน้ำ ต้องตรวจสอบการผุกร่อนที่พื้นผิวภายนอกของหลอดน้ำ

8.6.2.14 รายการที่ต้องตรวจสอบแยกสำหรับหม้อไอน้ำแบบไหลผ่านเลย (Once-through Boiler)

- (ก) ทำการตรวจสอบด้วยความดันน้ำ (Hydrostatic Test) และตรวจสอบการรั่วซึมและความผิดปกติอื่นๆ ในขณะที่ทดสอบ
- (ข) ตรวจสอบความร้อนสูงผิดปกติของหลอดน้ำในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง
- (ค) ตรวจสอบการผุกร่อนที่พื้นผิวภายนอกของหลอดน้ำในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ
- (ง) ภายหลังการล้างผิวด้วยกรดเพื่อการตรวจสอบ ต้องตรวจสอบคราบตะกอนและการอุดตันเนื่องจากตะกอน
- (จ) ถ้าเป็นหม้อไอน้ำแบบไหลผ่านเลยหลายหลอด (Multitube Type Once-through Boiler) ต้องตรวจสอบรายการดังต่อไปนี้
 1. รอยแตกร้าวที่จุดเชื่อมต่อ และอุปกรณ์ต่อพ่วงของหลอดน้ำในเฮดเดอร์บนและล่าง (Upper and Lower Header)
 2. การร้อนผิดปกติของหลอดน้ำ
 3. การหลุดลอกและหลุดร่วงของวัสดุทนไฟของเฮดเดอร์ส่วน

-ตัวอย่าง-

เอกสารรับรองความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำ

ข้าพเจ้า..... อายุ..... ปี อาชีพ.....
พักอยู่บ้านเลขที่..... หมู่..... ต...... อ...... จ......
ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด..... โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน..... ตั้งอยู่ ณ..... โทรศัพท์.....
ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ตามพระราชบัญญัติวิศวกร พ.ศ.2542
เลขทะเบียน สก/วท/ก..... ตั้งแต่วันที่..... ถึงวันที่..... และไม่อยู่ในระหว่างถูกสั่งพัก
หรือเพิกถอนใบอนุญาตฯ ตามสำเนาบัตรประจำตัวที่แนบมาพร้อมนี้ ได้รับอนุญาตให้ขึ้นทะเบียนเป็นวิศวกรตรวจสอบหม้อไอน้ำหรือ
หม้อต้มฯ เลขทะเบียน 6-..... หมุดอายุวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ.....
ข้าพเจ้าได้ทำการอัดน้ำทดสอบและตรวจสอบสภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน.....
ซึ่งตั้งอยู่ที่..... หมู่..... ต...... อ...... จ......
ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด..... โทรศัพท์.....
ประกอบกิจการ..... ทะเบียนโรงงานเลขที่..... หมุดอายุวันที่.....
ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานชื่อ..... จำนวนคนงาน..... คน
ตรวจสอบเมื่อวันที่..... เวลา..... น. โรงงานนี้มีหม้อไอน้ำทั้งหมด..... เครื่อง
หม้อไอน้ำเครื่องนี้หมายเลข..... ขณะตรวจ หม้อไอน้ำเครื่องอื่นอยู่ในสภาพ ☐ กำลังใช้งาน ☐ หยุด
ข้าพเจ้าได้ตรวจสอบสภาพหม้อไอน้ำเครื่องนี้ โดยการอัดน้ำ (Hydrostatic Test) ที่ความดันไม่น้อยกว่าเกณฑ์การอัดน้ำ
ทดสอบตามที่ระบุในหน้า 4 ของเอกสารนี้ และขอรับรองว่าหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ทุกส่วนของหม้อไอน้ำเป็นไปตามรายละเอียดแสดง
ไว้ในหน้า 2 และ 3 ของเอกสารนี้ ข้าพเจ้าได้ทำการตรวจสอบและหรือทดสอบอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม และหม้อไอน้ำเครื่องนี้
สามารถใช้งานได้โดยปลอดภัย เป็นเวลา..... ปี นับตั้งแต่ตรวจสอบ ที่ความดัน ซึ่งได้ปรับตั้งลิ้นนรภัยให้ปิดระบายไอน้ำที่ความดัน
ไม่เกิน..... ข้าพเจ้าจึงลงลายมือชื่อไว้เป็นหลักฐาน

(ลงชื่อ)..... (ลงชื่อ).....
(.....)
วิศวกรผู้ตรวจสอบ..... ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน.....

ก่อนการตรวจสอบฯ โปรดอ่านรายละเอียดในหน้า 4 ของเอกสารนี้

หม้อไอน้ำเครื่องนี้เป็นแบบหม้อไอน้ำ ☐ เรือ ☐ รถไฟ ☐ ถูกลม ☐ ท่อน้ำขวาง ☐ ท่อไพนอน (Package)
☐ ดัดแปลงมาจากหม้อไอน้ำแบบ..... อื่น ๆ (ระบุ)..... ใช้งานมาแล้ว..... ปี
หมายเลขเครื่อง..... สร้างโดย..... โดยออกแบบความดันสูงสุดไว้ที่.....
อุณหภูมิ..... อัตราการผลิตไอ..... พื้นที่ผิวรับความร้อน.....
แรงม้าหม้อไอน้ำ..... การเคลื่อนย้ายหม้อไอน้ำ ☐ ไม่เคย ☐ เคย เมื่อ.....
จาก (ที่ใด).....
ชื่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ..... ขึ้นทะเบียนฯ เลขที่..... หมุดอายุ พ.ศ.25.....
ชื่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ..... ขึ้นทะเบียนฯ เลขที่..... หมุดอายุ พ.ศ.25.....
ชื่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ..... ขึ้นทะเบียนฯ เลขที่..... หมุดอายุ พ.ศ.25.....

1. ตัวหม้อไอน้ำ

การต่อแผ่นเหล็กหม้อไอน้ำเป็นแบบ ☐ เชื่อม ☐ หมุดย้ำ เลือกหม้อไอน้ำหนา.....
 ผนวมน้ำหม้อไอน้ำ ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ ☐ โยนกั ☐ Asbestos ☐ อิฐทนไฟ ☐ อื่น ๆ
 ขนาดหม้อไอน้ำ Øยาว/สูง.....ท่อไฟใหญ่ ขนาด Ø.....ยาว.....หนา.....จำนวน.....ท่อ
 ท่อไฟเล็กขนาด Ø.....ยาว.....จำนวน.....ท่อ, ท่อไฟเล็กขนาด Ø.....ยาว.....จำนวน.....ท่อ
 ท่อน้ำ (สำหรับหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ) ขนาด Ø.....ยาว.....จำนวน.....ท่อ
 ผนังเตาขนาด.....หนา.....ผนังด้านหน้า-หลัง (End Plates) หนา.....
 ถังพักไอ (Header or Steam Dome) ขนาด Ø.....
 ช่องคนลง (Manhole) ☐ ไม่มี ☐ มี จำนวน.....ช่อง, ช่องมือลอด (Handhole) ☐ ไม่มี ☐ มี จำนวน.....ช่อง
 ช่องทำความสะอาดท่อน้ำ (สำหรับหม้อไอน้ำตั้งแบบท่อน้ำขวาง) ☐ ไม่มี ☐ มี จำนวน.....ช่อง
 เหล็กยึดโยงเป็นแบบ ☐ Stay Rod ขนาด Ø.....จำนวน.....ชุด
☐ Stay Tube ขนาด Ø.....จำนวน.....ชุด
☐ Gusset Stay หนา.....ด้านหน้า.....ชุด ด้านหลัง.....ชุด
☐ อื่น ๆจำนวน.....ชุด

2. สภาพอุปกรณ์ของหม้อไอน้ำ

2.1 ถังนิรภัย (Safety Valve) มีจำนวน.....ชุด เป็นแบบ

- ☐ แบบน้ำหนักถ่วง ขนาด Ø.....ระยะไอน้ำที่ความดัน
☐ แบบสปริงมีคานงัด ขนาด Ø.....ระยะไอน้ำที่ความดัน
☐ แบบ..... ขนาด Ø.....ระยะไอน้ำที่ความดัน

.....
.....
.....

2.2 ระบบความดัน

ความดันใช้งานปกติ (Working Pressure).....
 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) จำนวน.....ชุด สเกลสูงสุดอ่านได้.....
 สวิตช์ควบคุมความดัน (Pressure Control Switch) ☐ ไม่มี ☐ มี จำนวน.....ชุด
 ตั้งไว้ที่ความดัน..... Diff.Pressure.....

2.3 ระบบน้ำ

หลอดแก้วและวาล์วบังคับ มีจำนวน.....ชุด พร้อมท่อระบายจากวาล์วหลอดแก้วถึงระดับพื้น
 เครื่องควบคุมระดับน้ำ (Water Level Control) ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ ☐ ลูกลอย (Float Type) ☐ Electrode
☐ อื่น ๆ (ระบุ).....จำนวน.....ชุด
 เครื่องสูบน้ำเข้าหม้อไอน้ำเป็นแบบ ☐ Reciprocating ☐ Turbine ☐ อื่น ๆจำนวน.....ชุด
 โดยใช้พลังงานจาก ☐ ไฟฟ้า ☐ ไอน้ำ ☐ อื่น ๆ
 วาล์วกันกลับ (Check Valve) ที่ท่อน้ำเข้าหม้อไอน้ำ ขนาด Ø.....จำนวน.....ชุด
 น้ำที่เข้าหม้อไอน้ำ ☐ น้ำประปา ☐ น้ำบาดาล ☐ น้ำบ่อ ☐ น้ำคลอง ☐ อื่น ๆ (ระบุ).....
 กรรมวิธีการปรับสภาพน้ำ ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ ☐ Softener (Resin) ☐ เติมน้ำสารเคมี ☐ อื่น ๆ
 คุณสมบัติของน้ำเข้าหม้อไอน้ำ pH =Hardness =อื่น ๆ (ถ้ามี).....
 วาล์วถ่ายน้ำ (Blow Down Valve) ขนาด Ø.....จำนวน.....ชุด

2.4 ระบบการจ่ายไอน้ำ

วาล์วจ่ายไอน้ำ (Main Steam Valve) ขนาด Ø.....จำนวน.....ชุด
 วาล์วกันกลับที่ท่อจ่ายไอ (Check Valve) ขนาด Ø.....จำนวน.....ชุด
 ท่อจ่ายไอน้ำ (Steam Pipe) ขนาด Ø....., ผนวมน้ำท่อจ่ายไอน้ำ ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ.....

2.5 ระบบสัญญาณเตือนภัย ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ ☐ กระดิ่งไฟฟ้า ☐ โซเรน ☐ อื่น ๆ (ระบุ).....

2.6 ระบบการเผาไหม้

เชื้อเพลิงที่ใช้ ☐ ฟืน ☐ แกลบ ☐ ชีเสื่อย ☐ น้ำมันดีเซล ☐ น้ำมันเตากรด..... ☐ อื่น ๆ (ระบุ).....

ปริมาณการใช้ (ต่อหน่วยเวลา) ☐ มีระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง เป็นแบบ.....

ขนาดความสามารถ.....การฉีดทางเปลวไฟ ☐ 1 Pass ☐ 2 Pass ☐ 3 Pass ☐ 4 Pass

ปล่องไฟขนาด.....สูง.....ลมช่วยในการเผาไหม้ ☐ ธรรมชาติ ☐ พัดลมขนาด.....

สายล่อฟ้า ☐ ไม่จำเป็นต้องมี ☐ จำเป็นต้องมี (☐ มีเหมาะสม ☐ ยังไม่มี)

2.7 ปลั๊กหลอมละลาย (Fusible Plug) ☐ ไม่มี ☐ มี จำนวน.....ชุด

2.8 ระบบปรับปรุงประสิทธิภาพ

เครื่องอุ่นน้ำมัน (Oil Heater) ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ.....อุ่นถึงอุณหภูมิ.....

เครื่องอุ่นอากาศ (Air Heater) ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ.....อุ่นถึงอุณหภูมิ.....

เครื่องอุ่นน้ำ (Economizer) ☐ ไม่มี ☐ มี เป็นแบบ.....อุ่นถึงอุณหภูมิ.....

การนำคอนเดนเสดกลับมาใช้ ☐ ไม่มี ☐ มี ปริมาณ.....

2.9 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ (Pressure Vessel) ☐ ไม่มี ☐ มี (ระบุ)

เครื่องจักรไอน้ำ ขนาด Ø ใหญ่ (High Pressure)..... ขนาด Ø เล็ก (Low Pressure).....

จำนวน.....ชุด

เครื่อง.....จำนวน.....ชุด ใช้ความดัน..... ☐ มีลิ้นนรภัยตั้งความดันที่.....

เครื่อง.....จำนวน.....ชุด ใช้ความดัน..... ☐ มีลิ้นนรภัยตั้งความดันที่.....

เครื่อง.....จำนวน.....ชุด ใช้ความดัน..... ☐ มีลิ้นนรภัยตั้งความดันที่.....

เครื่อง.....จำนวน.....ชุด ใช้ความดัน..... ☐ มีลิ้นนรภัยตั้งความดันที่.....

รายงานผลการตรวจหม้อน้ำก่อนรับรอง

ท่อไฟใหญ่	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	ท่อไฟเล็ก	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
ผนังด้านหน้า-หลัง	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	ผนังเตา	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
เหล็กยึดโยง	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	ช่องมือลอด	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
ช่องคนลง	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	ท่อน้ำ	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
เกจวัดความดัน	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	ลิ้นนรภัย	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
เครื่องสูบน้ำเข้าหม้อไอน้ำ	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	สวิทช์ควบคุมความดัน	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
ระบบสัญญาณเตือนภัย	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง	เครื่องควบคุมระดับน้ำ	☐ เรียบร้อย	☐ บกพร่อง
สภาพตะกรันภายในหม้อไอน้ำ	☐ ไม่มี	☐ มี	☐ มาก	☐ ปานกลาง	☐ น้อย

รายละเอียดของส่วนที่บกพร่องและอื่น ๆ

.....

.....

.....

ข้าพเจ้าได้ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานดำเนินการซ่อมแซมแก้ไขจนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ก่อนลงลายมือชื่อรับรอง

.....(วิศวกรผู้ตรวจทดสอบ)

ข้อกำหนดในการตรวจสอบฯ และกรอกรายงานในเอกสารรับรองความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำ

ชื่อโรงงาน :-	ใช้ตามที่ระบุไว้ในใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงาน ถ้าไม่มีให้ใช้ชื่อผู้รับ ใบอนุญาตฯ
ประกอบกิจการโรงงาน :-	ใช้ตามที่ระบุในบรรทัดที่ 7 ของหน้า ที่ 1 ในใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงาน, รง. 4 (นับจากวันที่ลงมา)
ทะเบียนโรงงานเลขที่ :-	ใช้ตามที่ระบุในกรอบสี่เหลี่ยมมุมบนด้านขวาของใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงาน, รง. 4
หม้อไอน้ำหมายเลข :-	หม้อไอน้ำที่ติดตั้งก่อนถือว่าเป็นหมายเลข 1
ออกแบบความดันสูงสุด :-	ความดันสูงสุดที่ผู้สร้างกำหนดให้ใช้ (Max. Allowable Working Pressure)
สวิตช์ควบคุมความดัน :-	(ถ้ามี) จะต้องตั้งไว้ไม่เกินความดันใช้งานสูงสุด (Max. Working Pressure)
ลิ้นบริดจ์ :-	- ต้องติดตั้งที่ปลอดภัยหรือถังพัก ไอน้ำ และต้องไม่มีวาล์วต่อกันกลาง - ต้องเป็นแบบน้ำหนักถ่วงหรือแบบสปริงที่มีถ่วงน้ำหนัก ไม่มีการจำกัดห้ามใช้ หรือแบบอื่นที่สามารถตรวจสอบการเปิด ได้ง่าย มีขนาดที่สามารถระบายไอน้ำได้ทันเมื่อความดันเกินกำหนดและปรับตั้งให้ระบายที่ความดัน ไม่เกิน 10% ของความดันใช้งานสูงสุด (Max. Working Pressure) แต่ต้องไม่เกิน 3% ของการออกแบบความดันสูงสุด (Max. Allowable Working Pressure) - ต้องมีไม่น้อยกว่า 2 ชุด สำหรับหม้อไอน้ำที่มีพื้นที่ผิวรับความร้อนตั้งแต่ 50 ตารางเมตรขึ้นไป
ตะกอน :-	ถ้ามีมากกว่า 1/16 นิ้ว จะต้องล้างออก
การตรวจสอบ :-	ให้ใช้หลักวิชาการทางด้านวิศวกรรม หรือมาตรฐานสากลอันเป็นที่ยอมรับที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม เห็นชอบ
การอัดน้ำทดสอบ :-	ต้องใช้ความดัน 1.5 เท่าของความดันสูงสุดที่ออกแบบ (Max. Allowable Working Pressure) ถ้าความดัน ใช้งานสูงสุดต่ำกว่า 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 2 เท่า ของความดันที่ใช้งานสูงสุด ถ้าความดันใช้งานสูงสุดอยู่ระหว่าง 60-80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 120 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว

หมายเหตุ

1. ในการตรวจสอบหากพบว่า ส่วนประกอบและหรืออุปกรณ์ของหม้อไอน้ำส่วนหนึ่งส่วนใดมีข้อบกพร่องชำรุด หรือไม่ทำงาน วิศวกรผู้ตรวจสอบ ต้องแจ้งให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงาน ดำเนินการซ่อมปรับปรุงแก้ไข หรือเปลี่ยนใหม่ให้อยู่ใน สภาพเรียบร้อย ให้แล้วเสร็จสมบูรณ์ก่อนลงลายมือชื่อรับรอง
2. ต้องกรอกข้อความให้ครบทุกข้อ ข้อความใดที่ไม่ได้กรอก ต้องแสดงเหตุผล มิฉะนั้น เจ้าหน้าที่จะถือว่าไม่ได้ตรวจสอบหรือดูสภาพ ส่วนประกอบหรืออุปกรณ์ของหม้อไอน้ำนั้น และอาจพิจารณาไม่รับเอกสารฯ ฉบับนี้
3. ข้อความนอกเหนือจากที่ระบุในข้อกำหนด ให้ใช้หลักวิชาการทางวิศวกรรม

คำรับรองของผู้ประกอบกิจการโรงงาน

1. ข้าพเจ้าขอรับรองว่าในการตรวจสอบความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำครั้งนี้ วิศวกรผู้ตรวจสอบได้ดำเนินการตรวจสอบ หม้อไอน้ำ ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดจริง หากกรมโรงงานอุตสาหกรรมตรวจพบในภายหลังว่า มิได้มีการตรวจสอบ หม้อไอน้ำตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ข้าพเจ้ายินดีให้กรมโรงงานอุตสาหกรรม เพิกถอนใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงานโดยไม่มีเงื่อนไข
2. เมื่อครบกำหนดที่จะต้องตรวจสอบหม้อไอน้ำครั้งต่อไป ข้าพเจ้าจะต้องแจ้งเป็นหนังสือให้กรมโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณี โรงงานตั้งอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร หรือ สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด ในกรณี โรงงานตั้งอยู่นอกเขตกรุงเทพมหานคร ทราบล่วงหน้าไม่น้อยกว่า 7 วัน เพื่อที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม หรือสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด จะได้ส่งเจ้าหน้าที่ไปสังเกตการณ์ ในการตรวจสอบหม้อไอน้ำ

ข้าพเจ้าได้อ่านและเข้าใจในข้อความดังกล่าวข้างต้นแล้ว จึงลงลายมือชื่อไว้เป็นสำคัญ

ลงชื่อ.....ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการ โรงงาน
(.....)

8.7 เอกสารอ้างอิง

- 8.7.1 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง มาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำและหม้อต้มและภาชนะรับแรงดันในโรงงานที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549
- 8.7.2 เอกสารประกอบการฝึกอบรม “Boiler & Pressure Vessel Inspection”, ศสวท, 2541
- 8.7.3 Energy audit Reports of National Productivity Council
- 8.7.4 Energy Hand book, Second edition, Von Nostrand Reinhold Company - Robert L.Lofitness
- 8.7.5 Industrial boilers, Longman Scientific Technical 1999
- 8.7.6 www.boiler.com
- 8.7.7 www.eng-tips.com
- 8.7.8 www.worldenergy.org
- 8.7.9 Japanese Industrial Standards (JIS) Standard

หน่วยที่ 9 ระบบบำบัดไอเสีย

การเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมโดยตรงจากกลุ่มเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือกลุ่มของเชื้อเพลิงก๊าซก็ตาม สำหรับกลุ่มที่เผาไหม้เกิดมลภาวะน้อย ได้แก่ ก๊าซ ทั้งส่วนก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียม ส่วนกลุ่มของเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะถ่านหิน ซึ่งมีกัมมันตเป็นองค์ประกอบอยู่ รวมทั้งขี้เถ้าและฝุ่นละออง ซึ่งในการพิจารณาผลกระทบดังกล่าวอันเป็นพื้นฐานการปฏิบัติงานด้านระบบควบคุมมลภาวะในหม้อไอน้ำอันจะก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานลดผลกระทบ

9.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานในการพิจารณาออกแบบระบบบำบัดไอเสียจากหม้อไอน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรม ให้สามารถควบคุมมลพิษในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

9.2 ขอบเขตและนิยาม

9.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะศึกษาขอบเขตเฉพาะการควบคุมมลพิษจากหม้อไอน้ำที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมบริการ โดยเป็นเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นแหล่งอยู่กับที่เท่านั้น

9.2.2 นิยาม

9.2.2.1 ภาวะมลพิษในอากาศ (Air Pollution) หมายถึง การที่อากาศมีสารใดๆ เพิ่มขึ้นที่มีอยู่ อาจเป็นสารที่มีอยู่แล้ว หรือเป็นสารใหม่ที่เจือปนหรือปนเปื้อนเข้าไป เรียกว่าสารมลพิษ (Pollution) ส่งผลกระทบต่อภาวะต่างๆ ให้ผิดไปจากปกติ สารมลพิษที่มีอยู่แล้วในอากาศแต่มีอยู่น้อย ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรสออกไซด์ เป็นต้น สารมลพิษที่เจือปนเข้าไปในอากาศ ส่วนใหญ่มักมาจากการกระทำของมนุษย์มากกว่าเหตุหรือภัยตามธรรมชาติ สามารถแบ่งสารมลพิษออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ อนุภาค, ก๊าซ และกัมมันตรังสี

9.2.2.2 อนุภาค (Particulates) หมายถึง สารมลพิษที่เป็นอนุภาค ได้แก่ของแข็งหรือหยดของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ หรือก๊าซที่อุณหภูมิต่ำและความดันปกติ ยกเว้นไอน้ำ ที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1 μm ขึ้นไป จนถึงขนาดเล็กกว่า 200 μm คำที่ใช้เรียกที่เราคุ้นเคยกัน คือ ฝุ่น, ผง, ละออง, เถ้า, เขม่า, คาร์บอน และละอองสเปรย์ เป็นต้น

9.2.2.3 ก๊าซหรือไอระเหย หมายถึง สารมลพิษที่เป็นก๊าซ ซึ่งระเหยได้มีหลายชนิดทั้งที่มีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ทั้งที่เป็นก๊าซ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนิลซัลไฟด์, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, ก๊าซกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์, ก๊าซกลุ่มอัลคิลไฮโดรคาร์บอน, คลอรีน และมีเทน เป็นต้น และที่เป็นไอระเหย เช่น แอมโมเนีย, ไอไฮโดรคาร์บอน, ไอกรดซัลฟิวริก และไอกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

9.2.2.4 กัมมันตรังสี หมายถึง สารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลอาจเกิดจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ หรือจากกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ รวมทั้งอุตสาหกรรมและการแพทย์ที่ใช้กัมมันตรังสีด้วย

9.3 มาตรฐานและการควบคุม

หน่วยงานของรัฐที่มีบทบาทสำคัญได้แก่ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม กระทรวงอุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ การกำหนดมาตรฐานจะทำให้หลายลักษณะ ที่สำคัญ คือ การกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศ (Air Quality Standards) และมาตรฐานการปลดปล่อยสารพิษ (Emission Standards)

9.3.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศ

เป็นการกำหนดค่าสูงสุดของสารพิษที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศทั่วไป โดยระบุเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 1 ปี ค่าที่กำหนดนี้อาจใช้หน่วยเป็นส่วนในล้านส่วนหรือร้อยละโดยปริมาตร หรือหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ในระยะหลังๆ นิยมใช้หน่วยเป็นมิลลิกรัมหรือไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งใช้ได้ทั้งสารมลพิษที่เป็นอนุภาค, ก๊าซ หรือไอระเหย ตารางที่ 9.1 แสดงมาตรฐานคุณภาพอากาศของก๊าซและอนุภาคแขวนลอยของประเทศไทย ได้แก่ก๊าซ CO, O₃, NO₂ และ SO₂ และอนุภาคแขวนลอยทั้งหมด

ค่าปริมาณอนุภาคแขวนลอยทั้งหมดในบรรยากาศที่ถือว่าสะอาดควรอยู่ระหว่าง 50-75 µg/m³ ค่าที่จัดว่าอันตรายคือประมาณ 1,500 µg/m³ โดยทั่วไปอากาศสกปรกมักมีอนุภาคแขวนลอยทั้งหมดประมาณ 1-20 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร mg/m³ ดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศของก๊าซและอนุภาคแขวนลอยของประเทศไทย

Pollutant	Average Density	Standard
Carbon Monoxide	1 hr.	30 ppm (34.2 mg/cu m)
(CO)	8 hrs.	9 ppm (10.26 mg/cu m)
Lead	24 hrs.	-
(Pb)	30 days	1.5 microgram/cu m
Total Suspended Particulate	24 hrs.	0.33 mg/cu m
Matter (TSP)	1 Year	0.10 mg/cu m
Suspended Particulate Mater	24 hrs.	120 micro g/cu m
(PM-10)	1 Year	50 micro g/cu m
Ozone (O ₃)	1 hr.	0.10 ppm (0.20 mg/cu m)
Nitrogen Dioxide (NO ₂)		
Sulfur Dioxide (SO ₂)	1 hr.	0.3 ppm (0.78 mg/cu m)

ที่มา : <http://www.pcd.go.th>

9.3.2 มาตรฐานการปลดปล่อยสารมลพิษ

เป็นการกำหนดค่าสูงสุดของสารมลพิษที่ขอมให้มิได้ในก๊าซ หรือฟลูอิดก๊าซที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดจากปล่องควันของโรงงาน โดยระบุเป็นค่าสูงสุดของก๊าซหลายชนิด โลหะหนัก และอนุภาคแขวนลอย บางชนิดระบุค่าต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่ง คืออนุภาค และก๊าซ NO_2 สำหรับก๊าซ SO_2 ระบุค่าสูงสุดจากโรงงานผลิตกรดซัลฟริกเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 มาตรฐานการปลดปล่อยสารมลพิษทั้งก๊าซและอนุภาคแขวนลอยจากแหล่งกำเนิดของประเทศไทย

Substance	Source	Standard (mg/m^3)
Particulate	Boiler and furnace (oil)	300
	Boiler and furnace (coal)	400
	Boiler and furnace (other fuel)	400
	Steel and aluminum mfg.	300
	Other source	400
Antimony	Any source	20
Arsenic	Any source	20
Copper	Furnace or smelter	30
Lead	Any source	30
Chlorine	Any source	30
Hydrogen Chloride	Any source	200
Mercury	Any source	3
Carbon monoxide	Any source	1000 (870 ppm)
Sulfuric Acid	Any source	100 (25 ppm)
Hydrogen Sulfide	Any source	140 (100 ppm)
Sulfur dioxide	Sulfuric acid production	1300 (500 ppm)
Oxides of nitrogen	Boiler and furnace (coal)	940 (500 ppm)
	Boiler and furnace (other fuel)	470 (250 ppm)
Xylene		870 (200 ppm)

ที่มา : <http://www.pcd.go.th>

นอกจากนี้ได้กำหนดมาตรฐานการปลดปล่อยสารมลพิษสำหรับโรงงานไฟฟ้าใหม่ขึ้น ซึ่งระบุค่าสูงสุดของก๊าซที่ปลดปล่อยจากโรงงานไฟฟ้าต่างขนาดกันและใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกันไว้แตกต่างกัน อาทิ เช่น โรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินขนาดเล็กกว่า 300 MW ปลดปล่อยก๊าซ SO_2 ได้สูงสุดคือ 640 ppm และปลดปล่อยอนุภาคได้ $120 \text{ mm}/\text{m}^3$

เปรียบเทียบการปลดปล่อยสารมลพิษจากโรงงานขนาด 1,000 MW ที่ใช้ก๊าซ น้ำมันและถ่านหินในตารางที่ 9.3 แต่เนื่องจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ผลิตไฟฟ้าและในอุตสาหกรรมในประเทศ จึงเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของมลพิษ ถึงแม้การใช้เชื้อเพลิงเหลวและก๊าซก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ในระดับที่รุนแรงน้อยกว่าและจำกัดอยู่ในบางบริเวณ

ตารางที่ 9.3 การปลดปล่อยสารมลพิษจากโรงไฟฟ้าขนาด 1,000 MW ที่ใช้ก๊าซ น้ำมันและถ่านหิน

	อัตราการปลดปล่อย, 10^6 kgต่อปี		
	Gas ^τ	Fuel oil ^φ	Coal ^ψ
Ash content (%)	0	0.05	9
Sulfur content (%)	0	1.6	3.5
Particulates	0.46	0.73	4.49
SO _x	0.012	52.66	139.00
NO _x	12.08	21.70	20.88
Carbon monoxide	negligible	0.008	0.21
Hydrocarbons	negligible	0.67	0.52

^τ Based on the assumption that the plant burns 1.9×10^9 m³ gas/year

^φ Assuming that the plant burns 1.57×10^6 tons oil/year

^ψ Assuming that the plant burns with 3.5% sulfur, of which 15% remain in the ash.
The fly ash collection efficiency is 97.5%

9.3.3 ผลกระทบจากถ้ำถ่านหินและการควบคุม

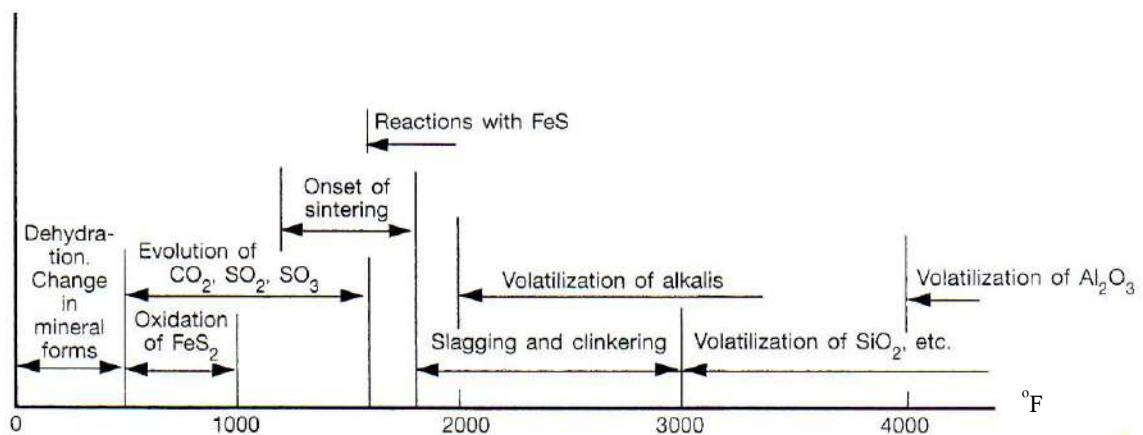
ตารางที่ 9.4 แสดงกลุ่มและองค์ประกอบหลักของสารอนินทรีย์ในถ่านหิน

Mineral	Formula
Clay minerals	
Montmorillonite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}^-$
Illite-sericite	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{XOH}$
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Halloysite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Chlorite (prochlorite, penninite)	$\text{Mg}_3\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{XOH}$
Mixed-layer clay minerals	
Sulfide minerals	
Pyrite	FeS_2
Marcasite	FeS_2
Sphalerite	ZnS
Galena	PbS
Chalcopyrite	CuFeS_2
Pyrrhotite	Fe_{1-x}S
Arsenopyrite	FeAsS
Millerite	NiS
Carbonate minerals	
Calcite	CaCO_3
Dolomite	$(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$
Siderite	FeCO_3
Ankerite (Ferroan dolomite)	$(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg})\text{CO}_3$
Witherite	BaCO_3
Sulfate minerals	
Barite	BaSO_4
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anhydrite	CaSO_4
Bassanite	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
Jarosite	$(\text{Na}, \text{K})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Szomolnokite	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Rozenite	$\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Melanterite	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Coquimbite	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Roemerite	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Mirabilite	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Kieserite	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Sideronatrite	$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Chloride minerals	
Halite	NaCl
Sylvite	KCl
Bischofite	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Silicate minerals	
Quartz	SiO_2
Biotite	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Zircon	ZrSiO_4
Tourmaline	$\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$
Garnet	$(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})_3(\text{Al}, \text{Fe})_2(\text{SiO}_4)_3$
Kyanite	Al_2SiO_5
Staurolite	$\text{Al}_4\text{FeSi}_2\text{O}_{14}(\text{OH})_2$
Epidote	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_{12}(\text{OH})$
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Sanidine	KAlSi_3O_8
Orthoclase	KAlSi_3O_8
Augite	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_6$
Hornblende	$\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{SiAl})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Topaz	$\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH}, \text{F})_2$
Oxide and hydroxide minerals	
Hematite	Fe_2O_3
Magnetite	Fe_3O_4
Rutile	TiO_2
Limonite	$\text{FeO} \cdot \text{OH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Goethite	$\text{FeO} \cdot \text{OH}$
Lepidocrocite	$\text{FeO} \cdot \text{OH}$
Diaspore	$\text{AlO} \cdot \text{OH}$
Phosphate minerals	
Apatite (fluorapatite)	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$

องค์ประกอบในสารอนินทรีย์ เมื่อได้รับความร้อนในสภาวะออกซิไดส์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเริ่มตั้งแต่การสูญเสีย (ของสารไฮเดรต) การออกซิไดส์ปลดปล่อยก๊าซต่างๆ ออกมา ทั้ง CO_2 , SO_2 และ SO_3 การเชื่อมติดกัน (Sintering) จนถึงการระเหยของอัลคาไล ตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ $1,100^\circ\text{C}$ ที่ช่วงอุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการหลอมเหลวเป็นสแลกและคลิงเกอร์ จนถึงขั้นสุดท้ายเกิดการระเหยของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน

(ซิลิกา) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,650 °C และของอลูมิเนียม (อะลูมินา) ที่อุณหภูมิประมาณ 2,200 °C ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง แสดงในรูปที่ 9.1

พบว่ากระแหของอัลคาไล โดยเฉพาะโซเดียม ซึ่งอยู่ในเนื้อถ่านหิน (Organically-Bound) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำตั้งแต่ประมาณ 750 °C ขึ้นไป และเกิดเป็นสารประกอบ NaOH ในก๊าซ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไป กลายเป็นสารประกอบโซเดียมซัลเฟต ซัลเฟต และคลอไรด์ เป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดการเกาะสะสมของเถ้า หลอมเหลวบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (Fire-Side Deposits) เนื่องจากจะไปเกาะและควบแน่นบนผิวท่อ มีความ เยี่ยมเหนียวทำให้เถ้าเบาเกาะสะสมเกิดขึ้นของสแลกที่เกาะติดแน่นลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Fouling) และการเกาะติดแน่นของชั้นสแลก (Slagging) แล้วเกิดปฏิกิริยากับผิวท่อและก๊าซกลุ่มซัลเฟอร์ ออกไซด์ที่นำไปสู่การกัดกร่อนผิวท่อที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Corrosion) ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มภาระการ ทำความสะอาดผิวท่อหรือถึงขั้นต้องหยุดปฏิบัติการเพื่อเปลี่ยนท่อ หรือการขจัดสแลกที่เกาะหนาจนร่วงหล่น ลงพื้นเตาเผา



รูปที่ 9.1 การเปลี่ยนแปลงของสารอนินทรีย์ในถ่านหินเมื่อได้รับความร้อน

9.3.4 การเกิดเถ้าเบา

กลไกการเกิดเถ้าและเถ้าเบาจากการเผาไหม้ถ่านหินมีสองกลไก

9.3.4.1 กลไกแรกเกิดจากสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ในเนื้อถ่านหินในบรรยากาศการเผาไหม้โดยเฉพาะใน เตาเผาถ่านหินบดละเอียดมีอุณหภูมิสูงมาก แม้ในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้ไอระเหยของเถ้าที่ถูกขังอยู่ ภายในอนุภาคดันออก กลายเป็นอนุภาคเถ้ากลวงเช่นเดียวกับการเกิดเซโนสเฟียร์ของคาร์บอนมี ขนาดใหญ่ประมาณ 10 μm

9.3.4.2 กลไกที่สองเกิดจากการระเหยของสารอนินทรีย์ส่วนน้อยในเนื้อถ่านหิน (ประมาณ 1%) คือไอ ของอัลคาไล (Volatile Species) แล้วควบแน่นกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กมากและรวมตัวกัน กลายเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นในบรรยากาศที่ไอลัลคาไลระเหยออกมาตลอดเวลาที่อุณหภูมิสูงใน ขณะเดียวกันสารอนินทรีย์ส่วนที่ระเหยยาก (Refractory Species) คือซิลิกา อะลูมินา เหล็ก ออกไซด์ และอื่นๆ ที่แตกออกจากผิวถ่านชาร์ก็จะทำให้เกิดการก่อตัวกันในบรรยากาศของไอลัล คาไลกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กมีเนื้อที่ (ประมาณ 0.01-0.1 μm)

เถ้าเถ้าที่ออกไปกับฟลูเก๊าส ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนที่มาจากสารอนินทรีย์ในถ่านหินและส่วนที่มาจากเถ้าไหม้ของถ่านหินที่ไม่สมบูรณ์ในรูปของคาร์บอนชีโนสเฟียร์ ส่วนที่มาจากสารอนินทรีย์มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม ในรูปของ CaO , MgO , Na_2O , และ K_2O สูงกว่าที่มีในสารอนินทรีย์หรือเถ้าถ่านหินเริ่มต้นองค์ประกอบแบบธรรมดาที่สำคัญอื่นๆ คือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 สมบัติของเถ้าเถ้าทั้งทางกายภาพและเคมีมีผลต่อการกำจัดออกจากฟลูเก๊าส ซึ่งที่จะกล่าวถึงในหัวข้อที่เกี่ยวข้องต่อไป

9.4 การกำจัดและควบคุมการปลดปล่อยเถ้าถ่านหิน

เถ้าเถ้าที่ติดออกไปกับฟลูเก๊าสมีปริมาณสูงมาก โดยเฉพาะระบบเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียดที่พื้นเตาแห้ง เถ้าถ่านหินที่ออกไปกับฟลูเก๊าสสูงถึงร้อยละ 70-100 ของเถ้าทั้งหมด และระบบเตาเผาไซโคลนปลดปล่อยเถ้าเถ้าที่น้อยที่สุดประมาณร้อยละ 10-30 ของเถ้าทั้งหมด ส่วนระบบตะแกรบปลดปล่อยเถ้าเถ้าที่น้อยกว่า โดยเฉพาะแบบตะแกรบเคลื่อนที่ซึ่งเผาไหม้แบบผสมทั้งป้อนเหนือตะแกรบและใต้ตะแกรบการแตกเป็นสะเก็ดเหนือเบดน้อยกว่าแบบป้อนเหนือตะแกรบ จึงปลดปล่อยเถ้าเถ้าที่น้อยที่สุดเพียงร้อยละ 30-50 ของเถ้าทั้งหมด

อย่างไรก็ดี กล่าวได้ว่าเถ้าเถ้าจากระบบเผาไหม้ต่างๆ เป็นผงละเอียดที่สามารถผ่านตะแกรงขนาด $300\ \mu\text{m}$ ได้ทั้งหมด (ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า $100\ \mu\text{m}$) จึงเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมมาก ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงหลักการทั่วไปและอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดและควบคุมอนุภาคในก๊าซ

หลักการสำคัญที่ใช้กำจัดอนุภาค คือ

- 9.4.1 การแยกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity)
- 9.4.2 การแยกด้วยแรงเฉื่อย (Inertia)
- 9.4.3 การใช้ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)
- 9.4.4 การกรอง (Filtration)
- 9.4.5 การล้าง (Scrubbing)

9.4.1 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

อนุภาคมีความหนาแน่นมากกว่าก๊าซ เมื่อปล่อยให้เข้าไปในห้องขนาดใหญ่ ความเร็วของก๊าซลดลง ฝุ่นจะตกลงข้างล่าง อุปกรณ์นี้เรียกว่า ห้องเก็บฝุ่น (Settling Chamber) เหมาะสำหรับก๊าซที่ความเร็วต่ำและมีฝุ่นขนาดใหญ่กว่า $100\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 9.2 (ก) แต่ถ้าวอกแบบพิเศษอาจเก็บฝุ่นขนาดเล็กกว่า $80\ \mu\text{m}$ ได้ อาจออกแบบให้ทิศทางการไหลเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ฝุ่นตกลงมาง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.2 (ข) ประสิทธิภาพจะดีขึ้นถ้าติดตั้งแผ่นปะทะชะลอความเร็วของฝุ่นและก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 9.2 (ค)

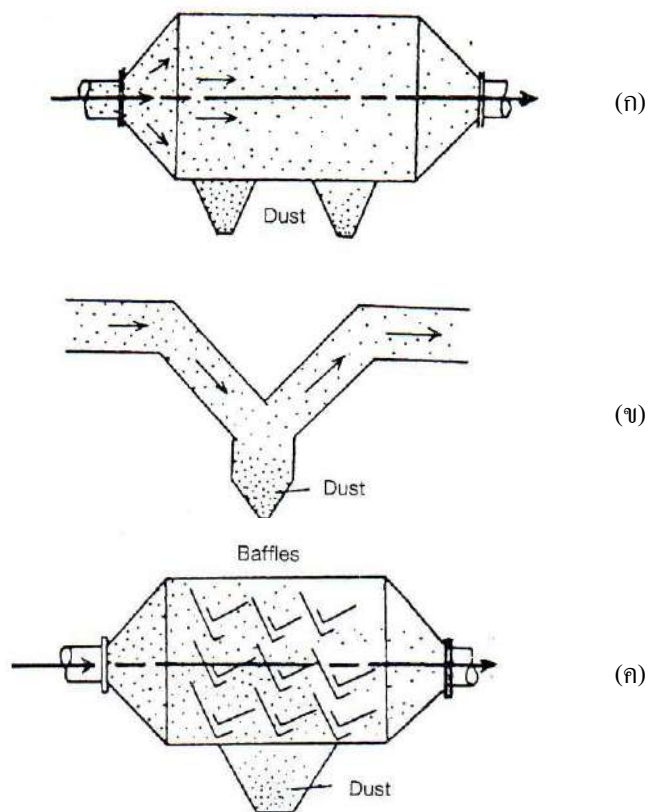
การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น

$$\eta = \frac{nWLV_t}{Q} \times 100\% \quad (9-1)$$

โดยที่

n	=	
W	=	ความกว้างของห้องเก็บฝุ่น, m
L	=	ความยาวของห้องเก็บฝุ่น, m
V_t	=	Terminal velocity ในแนวนอนของอนุภาค, m/s (อนุภาคจะวิ่งไปในกระแสก๊าซด้วยความเร็วอันหนึ่งเท่ากับ V_t ถ้าแรงที่กระทำบนอนุภาคทั้งหมดมีค่าคงที่ V_t นี้ก็จะคงที่ด้วย)
Q	=	อัตราเร็วของก๊าซ, m ³ /s

ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่ต้องใช้พลังงานในการปฏิบัติ ข้อเสียคือ ประสิทธิภาพต่ำ ไม่สามารถกำจัดอนุภาคที่เหลวได้ ใช้พื้นที่ติดตั้งมากและเลอะเทอะ โดยทั่วไปจึงต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นด้วย

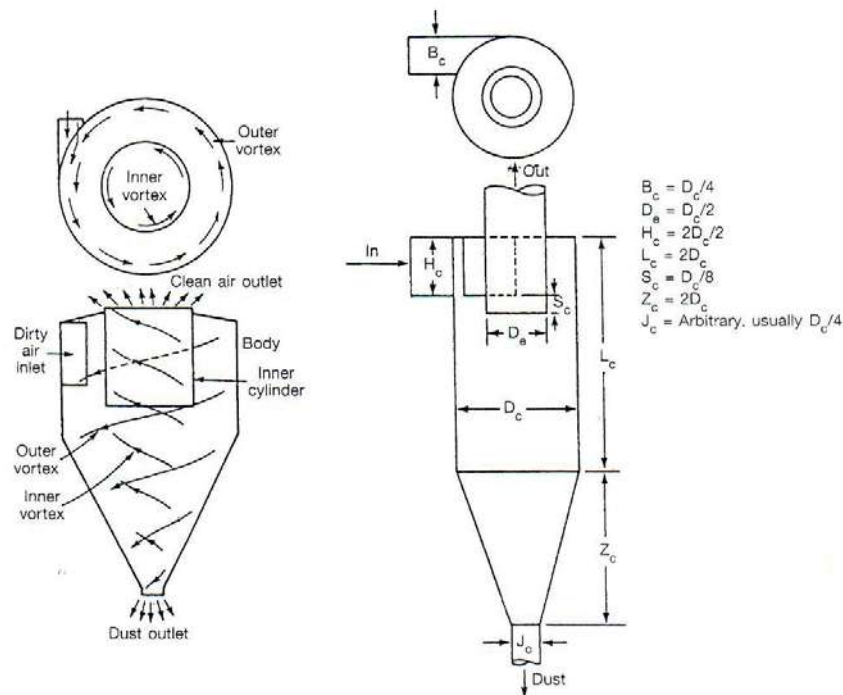


รูปที่ 9.2 อุปกรณ์แยกฝุ่น

9.4.2 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยแรงเฉื่อย

อาศัยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) โดยให้ก๊าซและอนุภาควิ่งในทางโค้ง อนุภาคจะเกิดแรงดึงออกจากโค้ง ถ้าไปปะทะกับแผ่นกั้นหรือผนัง ความเร็วจะลดลงและตกลงด้านล่าง

อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่รู้จักกันดีคือ ไซโคลน (Cyclone) ซึ่งนำก๊าซสกปรกเข้าในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวงของทรงกระบอกตั้งด้านบน ก๊าซและอนุภาคถูกหมุนปั่นตามแนวสัมผัสและหมุนวนเป็นเวอร์เทกซ์ลงสู่ด้านล่าง อนุภาคใหญ่ที่หนักกว่าหมุนปั่นออกจากแนวสัมผัสไปปะทะกับผนัง ความเร็วลดลงแล้วไหลลงตามแนวสอของกรวยสู่ก้นไซโคลน ในขณะที่อนุภาคเล็กกว่าถูกปั่นอยู่ในกระแสวนแล้วตกลงสู่ด้านล่างเช่นกัน ส่วนก๊าซที่สะอาดไหลย้อนขึ้นไปออกจากไซโคลนทางท่อด้านบน รูปที่ 9.3 แสดงหลักการและสัดส่วนมาตรฐานของไซโคลน ไซโคลนถือว่าเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้กันในการอุตสาหกรรมทั่วไป ผู้สนใจการออกแบบไซโคลนสามารถค้นคว้าได้จากคู่มือทางวิศวกรรมเคมีทั่วไป



รูปที่ 9.3 หลักการทำงานและสัดส่วนของไซโคลน

ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นของไซโคลนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = 1 - \exp \left[\frac{-(1-n) \rho_p D^2 \theta_1}{18 \mu W (R_2^{1-n} - R_1^{1-n}) R_2^n (R_2 - R_1)} \right] \quad (9-2)$$

โดยที่

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค

Q = อัตราเร็วของก๊าซ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$\theta_1 = (12\pi) =$ มุมที่อนุภาคอื่นในที่สุดจะตกกระทบผนัง

R_2 = รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของก๊าซสกปรก (ทรงกระบอกไซโคลน)

R_1 = รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของก๊าซสะอาด (ทรงกระบอกท่อทางออก)

n = ค่าคงที่ (0.5-0.7)

W = ความกว้างของช่องทางเข้าของก๊าซสกปรก

μ = ความหนืดก๊าซ

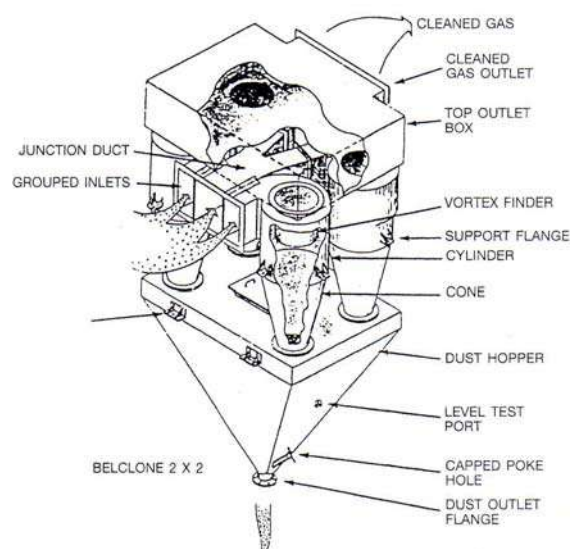
ไซโคลนเหมาะสำหรับอนุภาคหรือฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ 5 μm ขึ้นไป โดยประสิทธิภาพการทำงานขึ้นอยู่กับขนาดของไซโคลนและของอนุภาคดังนี้

ตารางที่ 9.5 ประสิทธิภาพการทำงานของขนาดของไซโคลนและของอนุภาค

เส้นผ่านศูนย์กลาง ไซโคลน, in (mm)	ประสิทธิภาพ, % รวม	ประสิทธิภาพ, %	
		ที่ขนาดเล็กกว่า, μm	ที่ขนาดใหญ่กว่า, μm
6 (150)	90	-5 66	+5 98
9 (225)	83	-10 60	+10 99
12 (300)			
24 (600)	70	-20 47	+20 98

ดังนั้นในการออกแบบและการใช้งาน นิยมใช้ไซโคลนที่ต่อกันเป็นชุด (Multiple Cyclones) มากกว่าเดี่ยว และนิยมใช้ไซโคลนขนาด 5 cm ถึง 30 cm ดังแสดงในรูปที่ 9.4

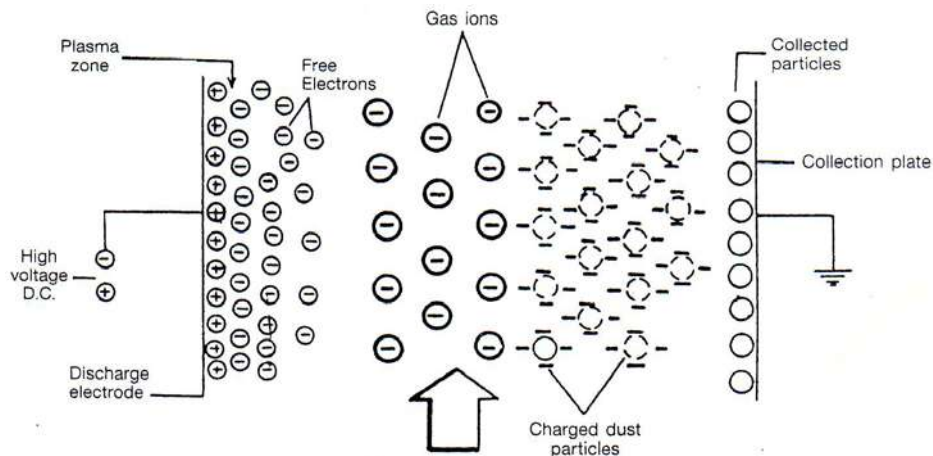
ข้อเด่นของไซโคลนคือ ค่าบำรุงรักษาต่ำ การทำงานได้ประสิทธิภาพสูงโดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ และการะงันสูง ข้อด้อย คือ ไม่สามารถกำจัดฝุ่นละเอียดได้ ประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีฝุ่นช่วงขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และต้องใช้พลังงานสูงเพื่อป้อนก๊าซเข้าสู่ไซโคลน



รูปที่ 9.4 ไซโคลนที่ต่อกันเป็นชุด(Multiple Cyclones)

9.4.3 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ใช้หลักการผ่านก๊าซสกปรกเข้าไปในสนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคเกิดประจุ (Ionize) ขึ้นแล้วจับอนุภาควิถีที่แผ่นอิเล็กโทรดที่มีประจุตรงกันข้าม แล้วทำให้อนุภาคที่เกาะตกลงสู่ที่รองรับเป็นระยะๆ ดังแสดงหลักการในรูปที่ 9.5



รูปที่ 9.5 หลักการแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) มักเรียกย่อว่า ESP ปฏิบัติงานในช่วงอุณหภูมิ 95-450 °C แต่สามารถออกแบบให้ปฏิบัติงานที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่านี้ได้ ความดันก๊าซที่เข้าประมาณ 600 mm, H₂O หลังจากผ่านเครื่องแยกแล้ว ก๊าซมีความดันลดเพียง 15-30 mm, H₂O เครื่องแยกแบบ ESP นี้สามารถรับภาระความเข้มข้นของอนุภาคในก๊าซได้สูงถึง 100 g/m³

ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นของเครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-AV_M}{V}\right) \quad (9-3)$$

โดยที่

$$V_M = \text{อัตราเร็วของอนุภาค} \text{ ซึ่ง } = \frac{R\phi_1\phi_2}{2\pi\mu}$$

R = รัศมีของอนุภาค

ϕ_1 = ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประจุ

ϕ_2 = ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้จับอนุภาค

μ = ความหนืดของก๊าซ

V = อัตราเร็วของก๊าซผ่านอนุภาค

A = พื้นที่ของอิเล็กโทรดที่จับประจุ

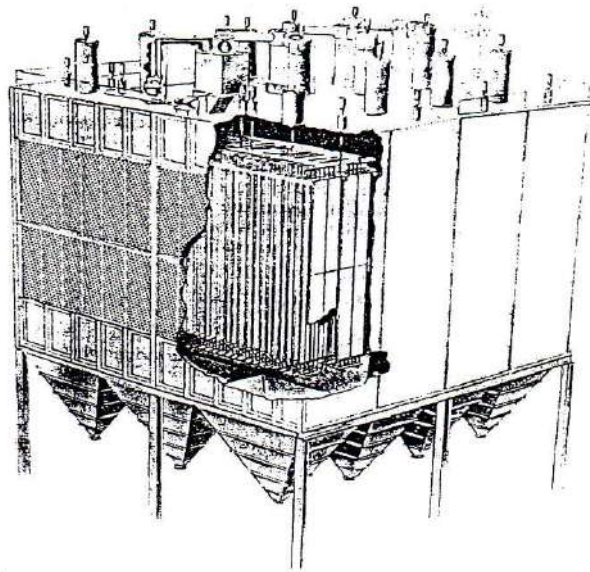
ในปัจจุบันวิธีแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดและสามารถแยกฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กมาก (จนถึง $0.01\ \mu\text{m}$) ก็ขนาดของไวรัสได้ จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากทั้งในขนาดเล็กที่ใช้ในรถยนต์ ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

9.4.3.1 ข้อเด่น มีหลายข้อคือ

- (ก) ประสิทธิภาพสูงมาก
- (ข) ใช้กับก๊าซสกปรกมาก
- (ค) ปฏิบัติการง่ายและไม่มีปัญหายุ่งยาก
- (ง) ค่าใช้จ่ายต่ำ
- (จ) ความดันลดต่ำ
- (ฉ) กำจัดได้ทั้งอนุภาคของแข็งและหยดของเหลว

9.4.3.2 ข้อด้อย มีน้อยได้แก่

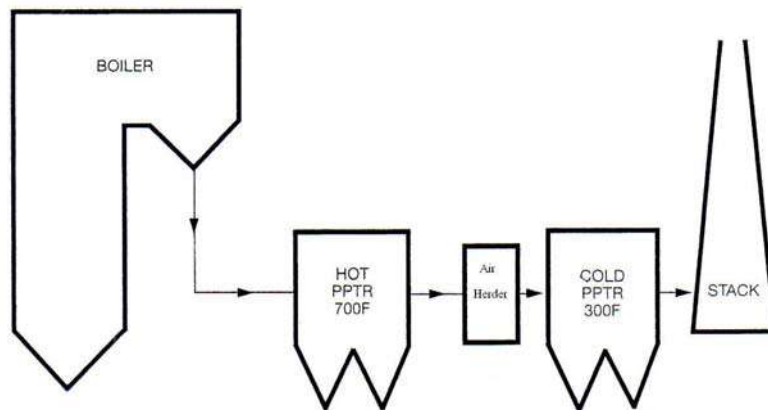
- (ก) ราคาแพง
- (ข) ใช้พลังงานสูง
- (ค) ประสิทธิภาพต่ำเมื่อรับภาระสูง
- (ง) ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก



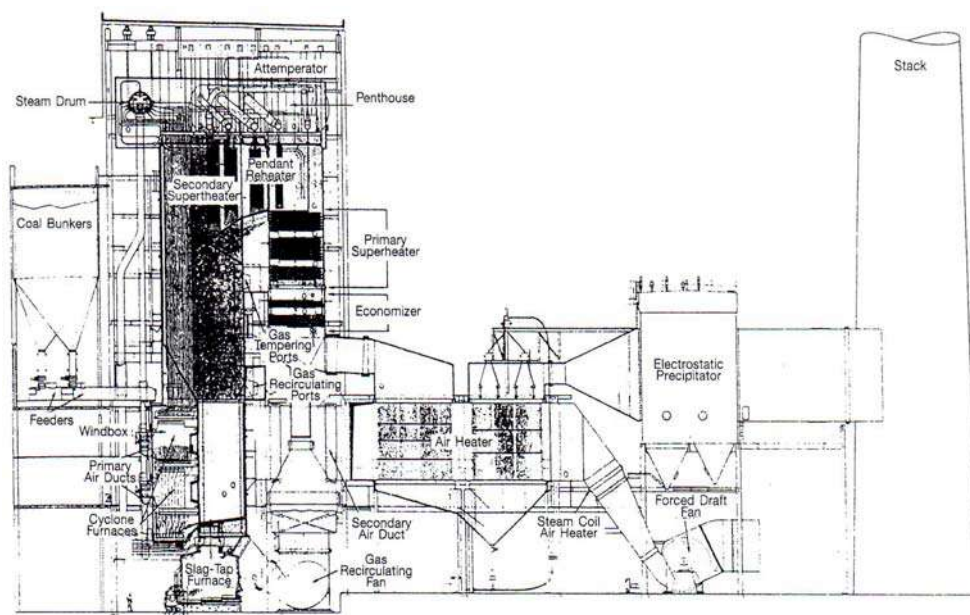
รูปที่ 9.6 ตัวอย่างเครื่องแยกแบบ ESP ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ในการใช้งาน จะติดตั้งอุปกรณ์กำจัดอนุภาคไว้ด้านหน้าปล่องควัน หรือต่อท้ายหม้อไอน้ำส่วนสุดท้าย คือ ต่อจากชุดอุ่นอากาศ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 9.7 แต่ในบางกรณี อาจติดตั้งด้านหน้าชุดอุ่นอากาศ โดยเฉพาะหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำ ($0.4-0.8\%$) อนุภาคในฟลูเก๊าสจะมีมีความต้านทานไฟฟ้าสูงที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานจะลดลงอีกประการหนึ่ง ถ้าติดตั้งด้านหน้าชุดอุ่นอากาศ ก๊าซที่เข้าไปในชุดอุ่นอากาศ จะเป็นก๊าซที่สะอาด ทำให้การปฏิบัติการมีประสิทธิภาพ

แนวปฏิบัติอีกประการหนึ่งคือ การติดตั้งไซโคลนควบคู่กับเครื่องแยกแบบ ESP โดยผ่านก๊าซสกปรกเข้าไซโคลนก่อน ทั้งนี้ เพื่อให้ไซโคลนแยกอนุภาคนขนาดใหญ่รวมทั้งคาร์บอนออกก่อน แล้วจึงให้เครื่องแยกแบบ ESP แยกอนุภาคนขนาดเล็กกว่าที่เหลืออยู่ จึงทำให้อุปกรณ์ทั้งสองปฏิบัติการที่ภาวะที่ดีที่สุด และได้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นรวมสูงที่สุดตลอดทั้งช่วงของภาระการกำจัดฝุ่นด้วย



รูปที่ 9.7 (ก) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องแยกอนุภาค ESP



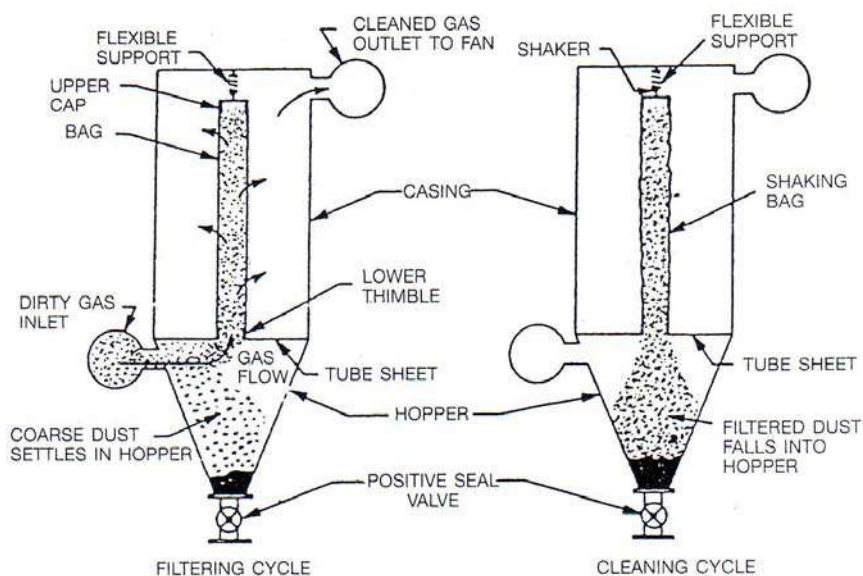
รูปที่ 9.7 (ข) ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องแยกแบบ ESP กับระบบหม้อไอน้ำ

9.4.4 การกรอง

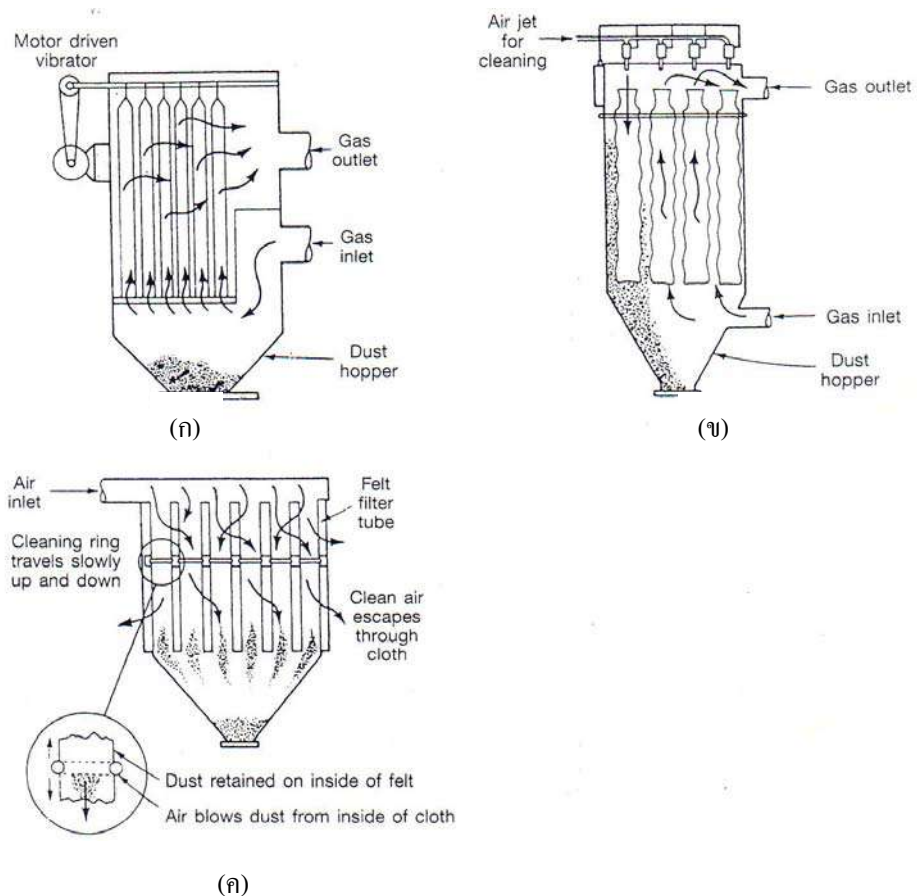
ใช้หลักการให้ก๊าซสกปรกไหลเส้นใยที่สานไว้ ทำให้อนุภาคถูกกรองไว้และปล่อยก๊าซสะอาดออกไป วัสดุที่ใช้มี 2 แบบ คือ แบบแผ่นกรองเส้นใยอัด (Packed Filter) ซึ่งมีเส้นใยหยาบสานกันหลวมๆ แล้วอัดเป็นแผ่นหนา เช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ เหมาะกับก๊าซที่ไม่สกปรกมากและแบบกระดาดกรอง หรือเนย

ชั้นเดียวทอเป็นผืนผ้า (Single-Layer Filter) เหมาะสำหรับกรองอนุภาคหรือฝุ่นละเอียดจากก๊าซที่สกปรกได้ เส้นใยที่ใช้อาจเป็นเส้นใยทอผ้าปกติ หรือเส้นใยพิเศษทนการกัดกร่อน เช่นเส้นใยแก้ว หรือเส้นใยเคลือบเพฟลอน ในการใช้งานจะนำมาทำเป็นถุงกรอง (Bag Filter) รูปทรงกระบอกยาวติดตั้งในแนวดิ่ง ทำงานเป็นรอบๆ เพื่อเข้าฝุ่นที่สะสมอยู่ออกเป็นระยะๆ ตัวอย่างขนาดถุงกรอง เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 125 – 300 mm ความสูง 1.80 – 6.0 m รักษาความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 20:1 การทำงานแสดงในรูปที่ 9.8

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความสามารถในการรับก๊าซสกปรก เครื่องกรองแบบนี้มีถุงกรองจำนวนมากติดตั้งอยู่ภายในห้องที่มีทางเข้าและทางออกของก๊าซร่วมกัน เรียกว่า Baghouse ซึ่งอาจเรียกว่าเครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง การออกแบบมีได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับวิธีนำก๊าซสกปรกเข้าและผ่านก๊าซสะอาดออก และขึ้นอยู่กับวิธีกำจัดอนุภาคออกเป็นระยะๆ เช่นในรูปที่ 9.9



รูปที่ 9.8 การทำงานของถุงกรอง



รูปที่ 9.9 เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง (Baghouse)
(ก) เครื่องเขย่า (ข) อากาศพ่น (ค) วงแหวนทำความสะอาด

คำแนะนำในการใช้งานในปัจจุบัน มีความนิยมใช้เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรองมาก โดยเฉพาะฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร สามารถเลือกใช้ระหว่าง เครื่องแยกแบบ ESP หรือเครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง เพราะมีประสิทธิภาพและสมรรถภาพในการกรองใกล้เคียงกัน แต่เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรองมีค่าใช้จ่ายต่ำ

9.4.5 การล้าง (wet scrubbing)

หลักการคือใช้ของเหลวที่ใช้ล้าง (เช่น น้ำ) ฉีดกระแทกกับกระแสก๊าซ ทำให้อนุภาคนปะทะกับหยดของเหลวที่ใช้ล้างเกิดการรวมตัวกันบนพื้นผิว และอาจมีของเหลวและก๊าซบางชนิดละลายลงในของเหลวแล้วออกจากระบบไป

กลไกการกำจัดเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน คือ

9.4.5.1 ก๊าซสกปรกพบกับหยดน้ำ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า อนุภาค 10-1,000 เท่า

9.4.5.2 อนุภาคและหยดของเหลวเกิดการชนปะทะ (Impinge) และกระแทก (Impact) กัน โดย Brownian Motion

9.4.5.3 อนุภาคเกาะบนผิวหยดของเหลวโดยแรงดึงดูดของเหลวเกิดการรวมตัวของอนุภาคและเกิดการละลายของของเหลวและก๊าซ

9.4.5.4 หยดของเหลวรวมตัวกันตกลงสู่ด้านล่างแล้วถูกนำออกจากระบบไป

อุปกรณ์และการออกแบบมีหลายลักษณะ เช่น ใช้หอสเปรย์ที่บรรจุวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสไว้ (Spray Tower) หรือใช้ก๊าซสกปรกปั่นเข้าไปในไซโคลน (Cyclone Spray Tower) หรือใช้การฉีดพ่นน้ำด้วยหัวฉีดพ่นปะทะกับก๊าซที่ปั่นเข้ามาในคอฉลิมน์ (Impingement Scrubber) หรือพ่นก๊าซสกปรกเข้ามากระทบกับน้ำตรงคอคอดแบบเวนทูรี (Venture Scrubber) ดังแสดงในรูปที่ 9.10 เป็นต้น

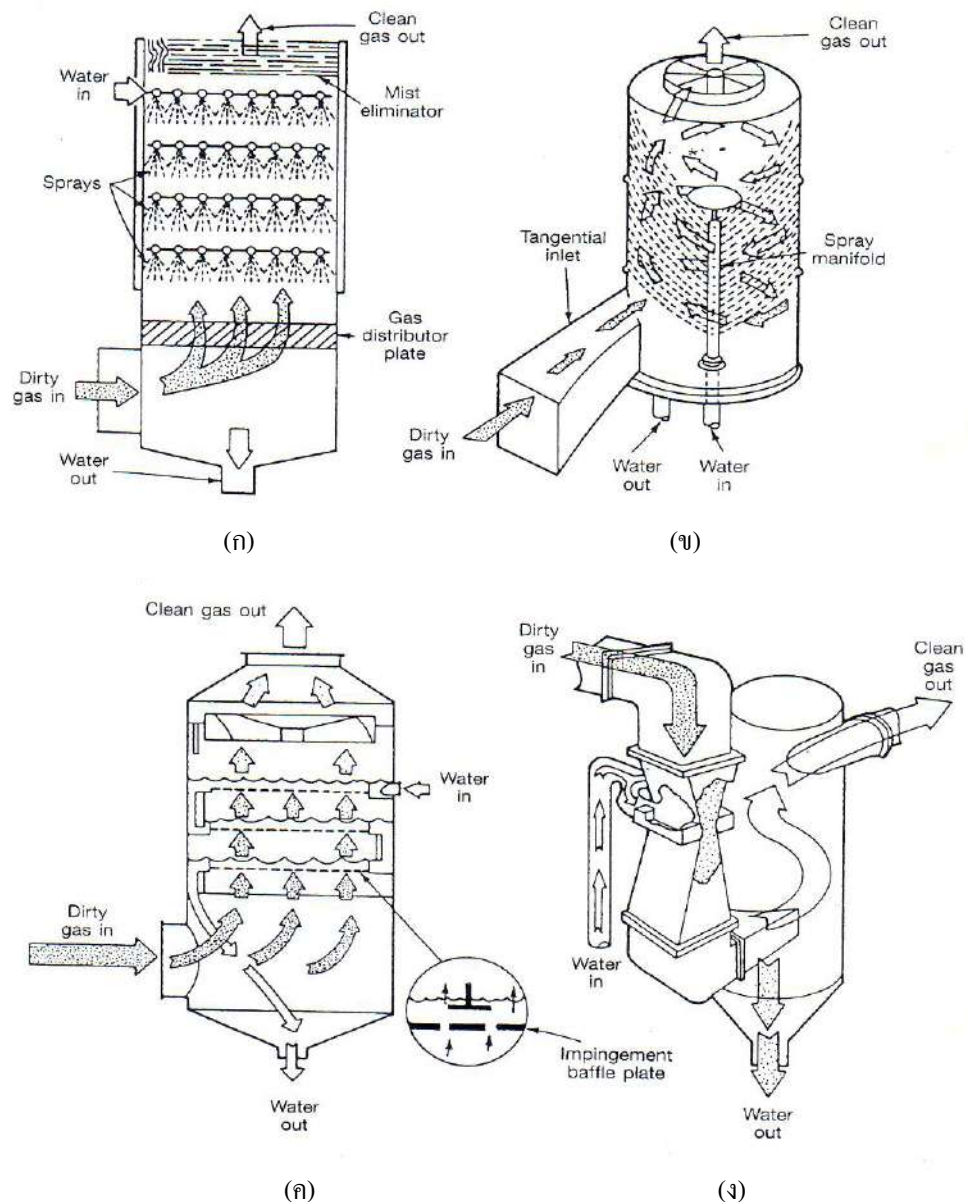
เครื่องล้างก๊าซเหมาะสำหรับกำจัดอนุภาคหลังจากก๊าซผ่านไซโคลนแล้ว และอนุภาคมีช่วงขนาดใหญ่กว่าที่จะต้องใช้เครื่องแยกแบบ ESP หรือแบบถุงกรอง คือในช่วง 2.5-10 μm โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 80%

(ก) ข้อเด่น

1. ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนมาก
2. ได้ประสิทธิภาพสูง
3. ทำหน้าที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ได้ด้วย คือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซมลพิษกับของเหลวที่ใช้ล้างพร้อมกันไป

(ข) ข้อด้อย

1. ต้องใช้พลังงานสูง
2. ของเหลวที่ใช้ล้างเมื่อแยกสารมลพิษออกแล้วต้องนำกลับมาใช้อีก จึงเกิดปัญหาการมีอนุภาคขนาดเล็กเจือปน ทำให้เกิดการสึกกร่อน (erosion) ที่หัวฉีด
3. ต้องกำจัดของเสียในรูปแบบน้ำเสียจากระบบกำจัด



รูปที่ 9.10 เครื่องล้างก๊าซชนิดต่างๆ

(ก) แบบหอสเปรย์, (ข) หอเสปรย์แบบไซโคลน, (ค) แบบแผ่นปะทะ และ (ง) แบบคอคอเวนทรี

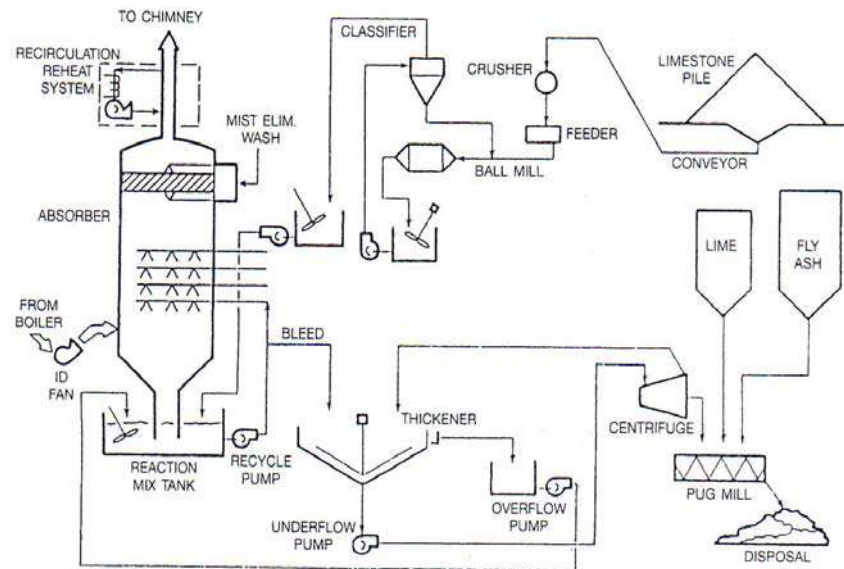
9.5 การควบคุมผลกระทบจากกำมะถัน ไนโตรเจน

การกำจัดและการควบคุมการปลดปล่อย สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซ SO_x ได้ในหลายขั้นตอนการใช้งาน คือ

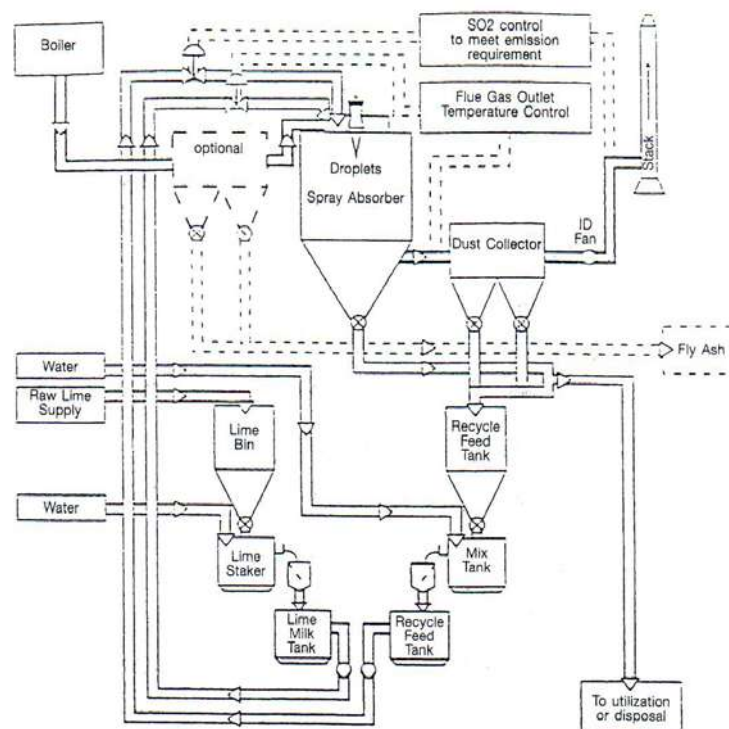
- 9.5.1 ก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion) โดยวิธีทำความสะอาดถ่านหิน กำมะถันไฟฟรต์ถูกล้างออกไปส่วน
ใหญ่ แต่วิธีนี้แพง หรือวิธีสลายถ่านหินด้วยความร้อนเพื่อไล่องค์ประกอบกำมะถันออกในรูปของก๊าซ H_2S ,
 SO_x และอื่นๆ ซึ่งยังอยู่ในขั้นวิจัยพัฒนา
- 9.5.2 ขณะเผาไหม้ (Combustion) โดยเติมปูนขาวเพื่อจับก๊าซ SO_x แต่สามารถกระทำได้ดีผลดีในระบบฟลูอิโดซ์
เบดเท่านั้น

9.5.3 หลังเผาไหม้ (Post-Combustion) โดยนำฟลูเกียซ์ไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดเป็นวิธีที่ได้ผลมากที่สุด แต่มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดด้วย วิธีนี้รู้จักกันในชื่อ Flue Gas Desulfurization เรียกย่อว่า FGD

ในรายละเอียดยังแบ่งออกเป็นกระบวนการกำจัดก๊าซ SO_x จากฟลูว์ก๊าซแบบเปียก (Wet FDG Process) และแบบแห้ง (Dry FDG Process) ดังแสดงในรูปที่ 9.11 และรูปที่ 9.12 ตามลำดับ



รูปที่ 9.11 กระบวนการกำจัดก๊าซ SO_x จากฟลูก๊าสแบบเปียก

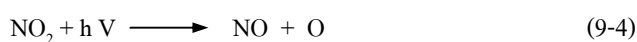


รูปที่ 9.12 กระบวนการกำจัดก๊าซ SO_x จากปลุก๊าซแบบแห้ง

9.5.4 ผลกระทบจากไนโตรเจน และการควบคุม

ในขณะเผาไหม้ สามารถเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์ได้ คือเกิดที่อุณหภูมิเปลวไฟ (ประมาณ 2,000 K) ในโตรเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เรียกว่า Thermal NO_x

ก๊าซกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นก๊าซมลพิษ โดยทั่วไปประกอบด้วยไนตริกออกไซด์มากกว่าไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยสารมลพิษเริ่มต้นคือ NO ถูกออกซิไดส์เมื่อพบกับออกซิเจนและโอโซนในบรรยากาศกลายเป็น NO_2 ซึ่งเป็นต้นเหตุของฝนกรดเนื่องจากละลายน้ำกลายเป็นกรดไนตริก (มีส่วนให้เกิดฝนกรดถึง 30 %) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีผลโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม สามารถทำลายพืช ทั้งทางใบและลดผลผลิตและทำให้เซลล์ของสัตว์เปลี่ยนแปลง ส่วนก๊าซไนตริกออกไซด์สามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงเช่นเดียวกับก๊าซ CO และทำให้ดาระคายเคือง แต่ที่สำคัญคือการเกิดปฏิกิริยาของ NO_2 ให้สารมลพิษทางโฟโตเคมี (photochemical pollutants) ดังสมการ



อัตราการปลดปล่อย NO_x จากหม้อไอน้ำขนาดเล็กประมาณ 100 ส่วนในล้านส่วน และขนาดใหญ่เช่นในโรงไฟฟ้าประมาณ 1,000 ส่วนในล้านส่วน แต่โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 200-500 ส่วนในล้านส่วนมาตรฐาน โดยทั่วไปกำหนดให้การปลดปล่อย NO_x ลดลงเหลือ 100 ส่วนในล้านส่วน สำหรับมาตรฐานของประเทศไทย กำหนดค่าการปลดปล่อยจากหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเหลือ 500 ส่วนในล้านส่วน และสำหรับโรงไฟฟ้าใหม่ ลดลงเหลือ 350 ส่วนในล้านส่วน

ในปัจจุบัน ไม่มีวิธีที่ดีที่จะกำจัดก๊าซ NO_x หลังจากออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจากก๊าซ NO เสถียรมาก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ผลและก๊าซ NO ไม่ละลายในน้ำด้วย จึงนิยมใช้วิธีควบคุมการเผาไหม้ให้เกิด NO_x น้อย วิธีที่ใช้คือ

9.5.4.1 การควบคุมปริมาณอากาศเกินพอ

9.5.4.2 การใช้ระบบเผาไหม้หลายขั้นตอน (Off - Stoichiometric หรือ Staged Combustion)

9.5.4.3 การนำฟลูก๊าซกลับมาป้อนใหม่ (Flue Gas Recirculation)

9.5.4.1 การควบคุมปริมาณอากาศเกินพอ

ในบรรยากาศห้องเผาไหม้ No ถูกออกซิไดส์เป็น NO_2 ดังนั้น การลดปริมาณอากาศเกินพอ จึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณ NO_2 ซึ่งเป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยาโฟโตเคมี ปริมาณของก๊าซ NO_x ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดและระยะเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดนั้น นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิง ตัวแปรในการออกแบบหัวเผาและการปฏิบัติการเตาเผาล้วนมีผลต่อการเกิดก๊าซ NO_x ทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่น หัวเผาที่ผนังซึ่งอยู่ชิดกันให้การปลดปล่อยก๊าซ NO_x สูงกว่าหัวเผาคิดตั้งที่มุมทั้งสิ้นของเตาเผา เป็นต้น การลดอากาศเกินพอนี้พบว่าสามารถลดการเกิด NO_x ได้ประมาณ 20-30%

9.5.4.2 การใช้ระบบเผาไหม้หลายขั้นตอน

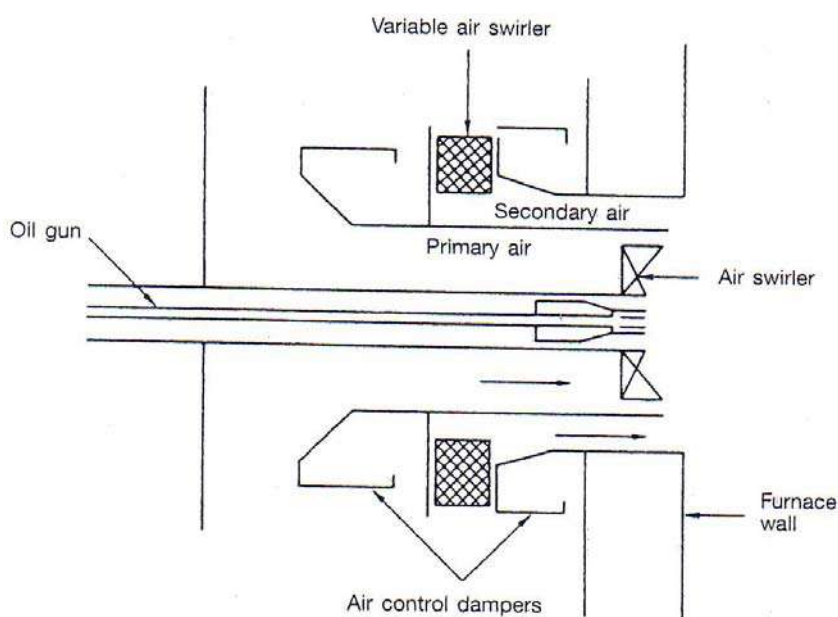
การจัดให้อากาศเข้าหลายขั้นตอนทำให้อุณหภูมิเปลวไฟลดลง ซึ่งทำให้เกิด Thermal NO_x ลดลง มีการออกแบบ หัวเผาปลดปล่อย NO_x ต่ำ (Low NO_x Burners) ทั้งสำหรับถ่านหิน หรือน้ำมันและถ่านหินร่วมกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 9.13 เป็นหัวฉีดน้ำมันแบบหมุนวนในแนวแกน (Axial Swirl) เป็นหัวฉีดที่นำอากาศส่วนที่สองเข้าจากภายนอก

หัวเผาปล่อย NO_x ต่ำเป็นที่นิยมใช้สำหรับถ่านหินแต่สามารถใช้ น้ำมันและถ่านหินร่วมกันได้ด้วย โดยนำอากาศส่วนที่สองและส่วนที่สามเข้าจากภายนอก ดังตัวอย่างในรูปที่ 9.14.

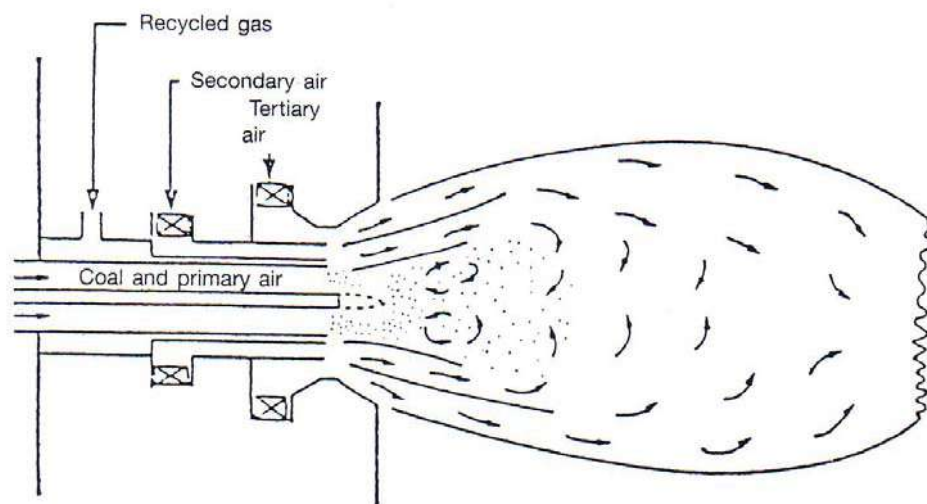
อีกแบบหนึ่งคือการวางหัวเผาที่มุมหรือแนวสัมผัส (Corner Firing) สำหรับถ่านหิน หรือน้ำมันและถ่านหินร่วมกัน เนื่องจากบริเวณตรงกลางมีสภาพเชื้อเพลิงเข้มข้น การเกิด NO_x จึงน้อยดังตัวอย่างในรูปที่ 9.15

9.5.4.3 การนำไอเสียกลับมาป้อนใหม่

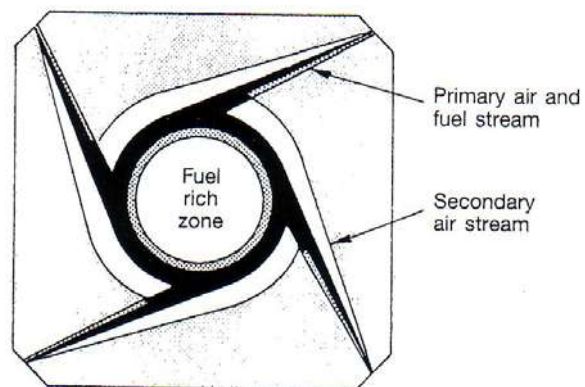
แบบหัวเผาที่มีช่องหรือท่อให้ฟลูก้าช้อนกลับมาป้อนด้านหน้าหัวเผาใหม่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 9.14 และรูปที่ 9.16 เป็นหัวเผ่อีกแบบหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเพราะนอกจากช่วยลดอุณหภูมิเปลวไฟแล้วยังมีผลให้การไหลและรูปแบบการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเปลี่ยนไปด้วย จึงสามารถลดการเกิด NO_x ได้ถึง 50% ดังแสดงในรูปที่ 9.17



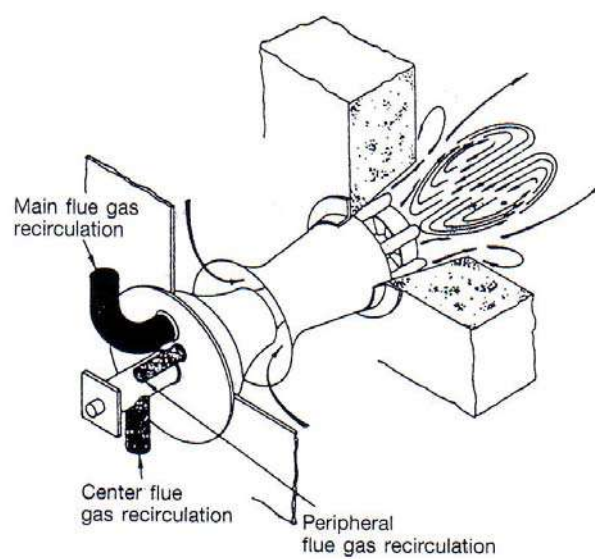
รูปที่ 9.13 หัวฉีดน้ำมันปลดปล่อย NO_x ต่ำแบบหมุนวนในแนวแกน



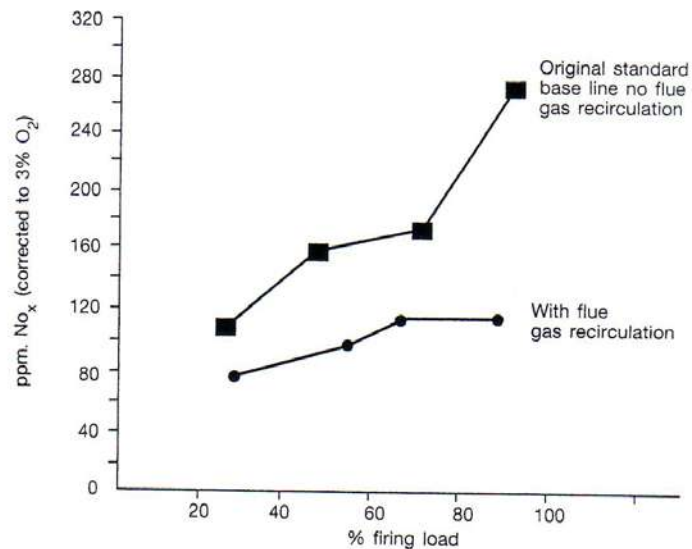
รูปที่ 9.14 หัวเผาถ่านหินร่วมกับน้ำมันลดปล่อย NO_x ต่ำ



รูปที่ 9.15 ห้องเผาไหม้ที่วางหัวเผาที่มุมหรือแนวสัมผัสที่เกิด NO_x น้อย



รูปที่ 9.16 หัวฉีดที่นำฟลูเกียซย้อนกลับป้อนหัวเผาไหม้



รูปที่ 9.17 ผลการลด NO_x ที่เกิดจากการนำฟลู๊ก๊าซย้อนกลับป้อนหัวเผาใหม่

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึงเฉพาะผลกระทบของมลพิษจากการเผาไหม้ที่เป็นมลพิษที่ต้องควบคุมหรือกำจัดหลังการเผาไหม้ก่อนปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ และเป็นมลพิษที่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานไว้แล้ว

นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นรวมทั้งความตื่นตัวของสังคมและชุมชนที่จะทำให้มีการดูแลและเฝ้าระวังผลกระทบของมลพิษที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศและสู่สิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่คาดหวังว่าในอนาคตประเทศจะมีสภาพแวดล้อมที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้นตามลำดับ

9.6 เอกสารอ้างอิง

1. รองศาสตราจารย์อัญญา บุญยเกียรติ, เชื้อเพลิงและการเผาไหม้, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. J.A. Barnard and J.N. Bradley, Flame and Combustion, Second edition, Chapman and Hall, 1985.
3. R.W. Bryers, Fireside slagging, fouling and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels, Prog. Energy Combust. Sci, 22, 29-120, 1996.
4. P. Chattopadhyay, Boiler Operation Engineering: Questions and Answers, Tata McGraw-Hill Publishing Co.Ltd., 1994, ISBN 0-07-460296-9.
5. N. Chigier, Energy, Combustion and Environment, McGraw Hill, 1981, 496 pp. ISBN 0 07 010766 1.
6. M. Crawford, Air Pollution Control Theory, McGraw-Hill Inc., 1976.
7. M.A. Elliott, ed. in chief, Chemistry of Coal Utilization, second supplementary volume, John Wiley and Sons, 1981.
8. J.C. Jones. Combustion Science: Principles and Practice, Millennium Book, 1993.
9. K.E. Noll, W.T. Davis and J.R. Duncan, ed., Air Pollution Control and Industrial Energy Production, Ann Arbor Science, 1975.
10. S.R. Turn, An Introduction to Combustion, Second edition, McGraw-Hill International Edition, 2000, 676 pp, ISBN 0 07 235044 x.

หน่วยที่ 10 การใช้งานและการควบคุมหม้อไอน้ำ

การใช้งานและการควบคุมหม้อไอน้ำ เป็นหน้าที่ที่สำคัญมากสำหรับผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ จุดมุ่งหมายไม่เพียงแต่การใช้งานด้วยความปลอดภัย แต่ยังช่วยยืดอายุการใช้งานทั้งโครงสร้าง อุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ ของหม้อไอน้ำ ให้คงอยู่ในสภาพที่ดี นอกจากนั้นยังทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำไม่ลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเชื้อเพลิงได้อย่างมาก นอกจากนี้ การตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นของผู้ควบคุมหรือวิศวกรก็จะสามารถป้องกันความเสียหายและอันตรายของการใช้หม้อไอน้ำรวมถึงการยกตัวอย่าง อุบัติเหตุซึ่งเกิดจากการปฏิบัติงานในกรณีของหม้อไอน้ำชนิดต่างๆ พร้อมทั้งการอธิบายสาเหตุ เพื่อหาทางป้องกันอันจะเกิดผลดีต่อการปฏิบัติงานด้านหม้อไอน้ำต่อไป

10.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางใน การปฏิบัติ ในการใช้งานหม้อไอน้ำอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

10.2 ขอบเขตและนิยาม

สำหรับหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตที่ต้องปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง อันจะมีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน โดยมีผู้ควบคุมระบบหรือผู้ควบคุมหม้อไอน้ำที่ต้องควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด วิศวกรที่มีหน้าที่อำนาจการใช้หม้อไอน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อไอน้ำที่มีความต้องการกำลังการผลิตไอน้ำสูงๆ

10.2.1 ขอบเขต

- 10.2.1.1 ในหน่วยนี้จะเน้นให้มีการปฏิบัติงานหรือใช้งานหม้อไอน้ำให้ถูกต้องตามกฎหมายซึ่งเป็นมาตรฐานต่ำสุดเป็นที่ยอมรับ แต่สำหรับหม้อไอน้ำบางประเภทอาจมีการควบคุมดูแลตามมาตรฐานที่สูงกว่าตามที่กฎหมายกำหนดได้

10.2.2 นิยาม

- 10.2.2.1 “ผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน” หมายความว่า คนงานประจำโรงงานที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงาน การตรวจสอบและบำรุงรักษาประจำหม้อไอน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน
- “วิศวกรควบคุมและอำนาจการใช้หม้อไอน้ำ” หมายความว่า วิศวกรตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกรที่รับผิดชอบการใช้หม้อไอน้ำซึ่งมีอัตราการผลิตไอน้ำตั้งแต่ 20 ตันต่อชั่วโมงขึ้นไป ควบคุมดูแลผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำ และจัดทำแผนการใช้งาน การบำรุงรักษาให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยและข้อกำหนดสำหรับหม้อไอน้ำ
- “วิศวกรตรวจทดสอบหม้อไอน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน” หมายความว่า วิศวกรตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกรที่ทำหน้าที่ตรวจทดสอบแบบแปลนการติดตั้งและควบคุมการติดตั้งตรวจสอบ และวิเคราะห์และจัดทำรายงานความปลอดภัยในการใช้งานของหม้อไอน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พร้อมทั้งแนะนำวิธีการแก้ไขให้ถูกต้องเป็นไปตามหลักวิศวกรรม
- “วิศวกรควบคุมการสร้าง หรือซ่อมหม้อไอน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน” หมายความว่า วิศวกรตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกรที่ทำหน้าที่ตรวจสอบและรับรองแบบ

ควบคุมตรวจสอบ กำกับดูแลการสร้าง การซ่อมแซม หรือการดัดแปลงหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน ให้เป็นไปตามแบบและรายละเอียดที่ผ่านการรับรอง

10.3 การใช้งานหม้อไอน้ำให้มีความปลอดภัย

การใช้งานหม้อไอน้ำที่ปลอดภัยนั้นมีหลายขั้นตอน เราควรจะเริ่มตั้งแต่การเลือกซื้อหม้อไอน้ำ การใช้งาน การควบคุมการใช้งานและการบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ จนกระทั่งถึงการตรวจสอบความปลอดภัยหม้อไอน้ำประจำปี ถ้าเราสามารถปฏิบัติได้ครบถ้วนก็จะครอบคลุมเพียงพอที่จะช่วยป้องกันอุบัติเหตุจากหม้อไอน้ำได้

10.4 การซื้อหม้อไอน้ำ

- 10.4.1 กรณีที่ซื้อหม้อไอน้ำจากต่างประเทศ ต้องหาหม้อไอน้ำที่ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) หรือมาตรฐานสากล ได้แก่ ASME, JIS, EN หรือมาตรฐานเทียบเท่า หากเป็นหม้อไอน้ำเก่าที่ใช้งานแล้วต้องมีเอกสารประวัติการใช้งาน การซ่อมแซมและการตรวจสอบ พร้อมต้องได้รับการพิสูจน์โดยหน่วยงานรับรองวิศวกรรมด้านหม้อไอน้ำ
- 10.4.2 สำหรับผู้ที่ซื้อหม้อไอน้ำผลิตในประเทศ ควรเลือกซื้อจากบริษัทหรือโรงงานที่มีการออกแบบ และคำนวณ และสร้างให้เป็นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.) หรือมาตรฐานสากล ได้แก่ ASME, JIS, EN หรือมาตรฐานเทียบเท่า และต้องให้มีหน่วยรับรองด้านหม้อไอน้ำ หรือวิศวกรควบคุมการสร้าง หรือซ่อมหม้อไอน้ำ ทำการตรวจสอบและรับรองแบบ พร้อมทั้งโรงงานจะต้องมีบุคลากรและเครื่องมือต่างๆ ดังนี้
 - 10.4.2.1 มีวิศวกรประจำหรือมีหน่วยรับรองวิศวกรรมด้านหม้อไอน้ำหรือหม้อต้ม
 - 10.4.2.2 มีเครื่องมือสร้างหม้อไอน้ำที่ทันสมัย
 - 10.4.2.3 วัสดุสำหรับสร้างหม้อไอน้ำโดยตรงและมีเอกสารรับรองคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุในส่วนที่รับแรงดันที่สามารถตรวจสอบแหล่งที่มาได้
 - 10.4.2.4 ใช้อุปกรณ์หม้อไอน้ำที่ได้มาตรฐาน
 - 10.4.2.5 มีผลงานการสร้างหม้อไอน้ำมานานจนเป็นที่ยอมรับ
 - 10.4.2.6 โรงงานผู้ผลิตหม้อไอน้ำที่มีการผลิตหรือการสร้างตามแบบที่ได้มีการออกแบบตามมาตรฐานสากลดังกล่าวและมีการรับรองแบบแล้ว
- 10.4.3 กรณีที่ซื้อหม้อไอน้ำเก่า ผู้ซื้อควรหาผู้ที่มีความชำนาญมาตรวจสอบ และพิสูจน์หม้อไอน้ำว่าให้สร้างความมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.) หรือตามมาตรฐานสากล

10.5 การใช้งานหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

การใช้งานหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานจะต้องดำเนินการขึ้นทะเบียนผู้ควบคุมหม้อไอน้ำหรือวิศวกรควบคุมและอำนวยความสะดวกให้หม้อไอน้ำ ตามที่กฎหมายกำหนด รวมทั้งจัดหาวิศวกรมาทำการตรวจสอบความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำ หรือหน่วยรับรองวิศวกรรมด้านหม้อไอน้ำ ซึ่งบุคคลต่างๆ ดังกล่าวมีหน้าที่และคุณสมบัติตามที่กฎหมายกำหนด ดังต่อไปนี้

- 10.5.1 ต้องจัดให้มีการขึ้นทะเบียนผู้ควบคุมอุปกรณ์หม้อไอน้ำที่มีคุณสมบัติตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำหรือหม้อต้มฯ ปี พ.ศ. 2549 ถ้าหากหม้อไอน้ำมีขนาดกำลัง

การผลิตไอน้ำ ตั้งแต่ 20 ตันต่อชั่วโมง ขึ้นไปนอกจากต้องมีผู้ควบคุมหม้อน้ำแล้ว ยังจะต้องขึ้นทะเบียนวิศวกรควบคุมและอำนวยความสะดวกด้วย

10.5.2 ต้องจัดให้มีการตรวจ ทดสอบความปลอดภัยในการใช้หม้อน้ำ เป็นประจำอย่างน้อยปีละครั้ง ทั้งภายนอกและภายใน และตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมและอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆ ตามหลักเกณฑ์และวิธีการตรวจ ทดสอบหม้อน้ำ และหม้อต้มตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำหรือหม้อต้มฯ ปี พ.ศ. 2549 โดยมีเอกสารรับรองการตรวจ ทดสอบทุกครั้ง และต้องส่งต้นฉบับไปที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรม

10.5.3 หน้าที่ของผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำหรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน

10.5.3.1 ควบคุม ดูแลประจำหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนตลอดเวลาที่ปฏิบัติงานในหน้าที่

10.5.3.2 ตรวจสอบความเรียบร้อยของหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนก่อนเดินเครื่องและขณะเดินเครื่อง

10.5.3.3 ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ และค่าควบคุมต่างๆตามช่วงระยะเวลา พร้อมจัดทำและเก็บรักษายบันทึกรายงานประจำวัน พร้อมทั้งจะให้เจ้าหน้าที่ตรวจดูได้ตลอดเวลา

10.5.3.4 ควบคุม ดูแลคุณภาพน้ำป้อน และน้ำภายในหม้อน้ำให้เป็นไปตามประกาศ เรื่องคุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ

10.5.3.5 ให้หยุดใช้งานหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนทันที เมื่อพบข้อบกพร่องของหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายร้ายแรงและแจ้งให้วิศวกรควบคุมและอำนวยความสะดวกหม้อน้ำ หรือผู้ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานทราบทันที

สำหรับคุณสมบัติของผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำหรือหม้อต้ม มีดังนี้

1. ต้องผ่านการอบรมและสอบตามหลักสูตรผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนที่ระบุในภาคผนวก 2 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อไอน้ำฯ ปี 2549 หรือ
2. ต้องมีคุณสมบัติได้รับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างกลโรงงาน หรือช่างยนต์ หรือช่างเทคนิคอุตสาหกรรม หรือช่างเทคนิคการผลิต หรือสาขาอื่นที่มีวิชาการเรียนภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติ เกี่ยวกับไอน้ำ ความร้อน การเผาไหม้ การประหยัพลังงาน ความแข็งแรงของวัสดุ รวมกันไม่น้อยกว่า 9 หน่วยกิต

10.5.4 หน้าที่ของวิศวกรควบคุมและอำนวยความสะดวกหม้อน้ำ มีดังนี้

10.5.4.1 ควบคุม กำกับการดูแลให้บุคลากรต่างๆที่ทำงานเกี่ยวข้องกับหม้อน้ำ ปฏิบัติงานตามมอบหมาย

- 10.5.4.2 อำนวยความสะดวก วางแผน จัดทำแผน และดำเนินการตามแผนในการใช้งาน การตรวจสอบและบำรุงรักษาหม้อน้ำให้มีความมั่นคงแข็งแรงปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และสนับสนุนการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม
- 10.5.4.3 จัดให้มีการตรวจสอบเพื่อความปลอดภัยในการใช้หม้อน้ำ ตามที่กฎหมายกำหนด
- 10.5.4.4 ควบคุมการแก้ไข และซ่อมแซมหม้อน้ำให้อยู่ในสภาพที่ปลอดภัยต่อการใช้งาน
- 10.5.4.5 ให้อำนาจการใช้งานหม้อน้ำทันที เมื่อพบข้อบกพร่องของหม้อน้ำซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายร้ายแรง และแจ้งให้ผู้ได้รับอนุญาตประกอบกิจการ โรงงานทราบทันที
- 10.5.4.6 รับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดในการปฏิบัติหน้าที่

สำหรับคุณสมบัติของวิศวกรควบคุมและอำนวยความสะดวก มีดังนี้

1. ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกร และไม่อยู่ในระหว่างพักใช้ใบอนุญาต
2. ไม่เป็นผู้ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียนต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม และยังไม่พ้นกำหนดระยะเวลา 3 ปี นับจากวันที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียน

10.5.5 หน้าที่ของวิศวกรตรวจสอบหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน

- 10.5.5.1 ตรวจสอบแบบแปลนการติดตั้ง รวมถึงระบบท่อต่างๆสำหรับหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนใหม่ก่อนการติดตั้ง พร้อมจัดทำรายงานผลการตรวจสอบ ส่งให้ผู้ประกอบกิจการ โรงงาน
 - 10.5.5.2 ตรวจสอบความปลอดภัยภายหลังการติดตั้งและตรวจสอบความปลอดภัยประจำปีของหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย โดยถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในภาคผนวก 3 พร้อมทั้งจัดทำรายงานผลการตรวจสอบตามแบบที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมประกาศกำหนด ส่งให้ผู้ประกอบกิจการ โรงงาน
 - 10.5.5.3 หากตรวจสอบพบว่า หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด หรือไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ต้องแจ้งผู้ประกอบกิจการ โรงงาน และกรมโรงงานอุตสาหกรรมทราบทันที
 - 10.5.5.4 รับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดในการปฏิบัติหน้าที่
- สำหรับคุณสมบัติของวิศวกรตรวจสอบหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน มีดังนี้
1. ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกร และไม่อยู่ในระหว่างพักใช้ใบอนุญาต
 2. ไม่เป็นผู้ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียนต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม และยังไม่พ้นกำหนดระยะเวลา 3 ปี นับจากวันที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียน

- 10.5.6 หน้าที่ของวิศวกรควบคุมการสร้าง หรือซ่อมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน มีดังนี้
- 10.5.6.1 ตรวจสอบพิสูจน์ความถูกต้องในการออกแบบสำหรับการผลิต หรือซ่อมแซมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนของวิศวกรผู้ออกแบบ พร้อมจัดทำหนังสือรับรองแบบส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงานสร้างหรือซ่อมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนโดยอย่างน้อยต้องมีการระบุนาตรฐานการออกแบบ วิศวกรผู้ออกแบบ อัตราการผลิตไอ หรือค่าความร้อนที่ผลิตได้ ชนิดของเชื้อเพลิง รุ่น(Model) ในหนังสือรับรองแบบ ทั้งนี้ผู้ออกแบบและผู้ตรวจพิสูจน์แบบต้องไม่เป็นบุคคลเดียวกัน และไม่เป็นผู้นับปฏิบัติงานในหน่วยงานเดียวกัน
- 10.5.6.2 ตรวจสอบการสร้าง หรือซ่อมแซมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พร้อมจัดทำรายงานการตรวจสอบการสร้างส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงานสร้างหรือซ่อมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน โดย
- ก. ตรวจสอบวัสดุที่ใช้ในการผลิต ขั้นตอนการผลิตหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน
 - ข. ตรวจสอบสภาพโรงงานที่สร้างหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน รวมทั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
 - ค. ตรวจสอบคุณสมบัติของบุคลากรให้เหมาะสมกับข้อกำหนดในงานที่ปฏิบัติ
- 10.5.6.3 ตรวจสอบการคำนวณ การออกแบบ การสร้าง หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนที่นำเข้าจากต่างประเทศ พร้อมจัดทำหนังสือรับรองการตรวจสอบ ส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงานที่มีความประสงค์ใช้หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนดังกล่าว
- 10.5.6.4 จัดทำสรุปรายงานผลการดำเนินการตาม (1)ถึง(3) ตามแบบที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมประกาศกำหนด จัดส่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมทุก 6 เดือน ทั้งนี้ กรณีมีการดำเนินการตาม (1) ให้แนบสำเนาหนังสือรับรองแบบด้วย
- 10.5.6.5 หากตรวจสอบพบว่า การออกแบบ การผลิต หรือการซ่อมแซมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด หรือไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ต้องแจ้งผู้ออกแบบ หรือผู้ประกอบการ โรงงานทราบทันที
- สำหรับคุณสมบัติของวิศวกรควบคุมสร้างหรือซ่อมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน มีดังนี้
1. ได้รับอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกร และไม่อยู่ในระหว่างพักใช้ใบอนุญาต
 2. ไม่เป็นผู้ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียนต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม และยังไม่พ้นกำหนดระยะเวลา 3 ปี นับจากวันที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียน

- 10.5.7 หน้าของหน่วยรับรองวิศวกรรมด้านหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน มีดังนี้
- 10.5.7.1 ตรวจสอบพิสูจน์ความถูกต้องในการออกแบบสำหรับการผลิต หรือซ่อมแซมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนของวิศวกรผู้ออกแบบ พร้อมจัดทำหนังสือรับรองแบบ ส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงานสร้างหรือซ่อมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน โดยอย่างน้อยต้องมีการระบุมาตรฐานการออกแบบ วิศวกรผู้ออกแบบ อัตราการผลิตไอน้ำ หรือค่าความร้อนที่ผลิตได้ ชนิดของเชื้อเพลิงรุ่น (Model) ในหนังสือรับรองแบบ ทั้งนี้ผู้ออกแบบและผู้ตรวจพิสูจน์แบบต้องไม่เป็นบุคคลเดียวกัน และไม่เป็นผู้นับปฏิบัติงานในหน่วยงานเดียวกัน
 - 10.5.7.2 ตรวจสอบการสร้าง หรือซ่อมแซมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พร้อมจัดทำรายงานการตรวจสอบการสร้างส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงานสร้างหรือซ่อมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน โดย
 - ก. ตรวจสอบวัสดุที่ใช้ในการผลิต ขั้นตอนการผลิต การทดสอบรอยบกพร่องจากกระบวนการผลิตหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน ให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล
 - ข. ตรวจสอบสภาพโรงงานที่ผลิตหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน รวมทั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
 - ค. ตรวจสอบคุณสมบัติของบุคลากรให้เหมาะสมกับข้อกำหนดในงานที่ปฏิบัติ
 - 10.5.7.3 ตรวจสอบการคำนวณ การออกแบบ การสร้าง หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนที่นำเข้าจากต่างประเทศ พร้อมจัดทำหนังสือรับรองการตรวจสอบ ส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงานที่มีความประสงค์ใช้หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนดังกล่าว
 - 10.5.7.4 ตรวจสอบแบบแปลนการติดตั้ง รวมทั้งระบบท่อต่างๆสำหรับหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนใหม่ก่อนการติดตั้ง พร้อมจัดทำรายงานผลการตรวจสอบ ส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงาน
 - 10.5.7.5 ตรวจสอบทดสอบความปลอดภัยภายหลังการติดตั้งและตรวจสอบความปลอดภัยประจำปีของหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย โดยถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในภาคผนวก 3 พร้อมทั้งจัดทำรายงานผลการตรวจสอบตามแบบที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมประกาศกำหนด ส่งให้ผู้ประกอบการ โรงงาน
 - 10.5.7.6 สรุปรายงานผลการดำเนินการตาม (1)ถึง(3) ตามแบบที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมประกาศกำหนด จัดส่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมทุก 6 เดือน ทั้งนี้กรณีมีการดำเนินการตาม (1) ให้แนบสำเนาหนังสือรับรองแบบด้วย
 - 10.5.7.7 หากตรวจสอบพบว่า การออกแบบ การผลิต หรือการซ่อมแซมหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด หรือไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ต้องแจ้งผู้ออกแบบ หรือผู้ประกอบการ โรงงานทราบทันที
 - 10.5.7.8 รับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดในการปฏิบัติหน้าที่

สำหรับคุณสมบัติของหน่วยรับรองวิศวกรหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน มีดังนี้

1. เป็นนิติบุคคลที่จัดทะเบียนภายใต้กฎหมายไทย และมีทุนจดทะเบียนไม่น้อยกว่า 1 ล้านบาท
2. มีสำนักงานที่แน่นอน สถานที่ปฏิบัติงานที่เหมาะสมและมีพื้นที่เพียงพอเพื่อใช้ในการเก็บเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบและตรวจสอบ
3. มีวิศวกรเครื่องกลที่มีคุณสมบัติและคุณวุฒิดังนี้จำนวนไม่น้อยกว่า 1 คน
4. ได้รับอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกร และไม่อยู่ระหว่างการพักใช้ใบอนุญาต
5. มีประสบการณ์ด้านงานหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อนไม่น้อยกว่า 3 ปี
6. มีผู้ชำนาญการที่ผ่านการฝึกอบรมเกี่ยวกับการทดสอบแบบไม่ทำลาย ได้แก่ การทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง การทดสอบด้วยผงแม่เหล็ก การทดสอบด้วยสารแทรกซึม จากสถาบันที่เชื่อถือได้ จำนวนไม่น้อยกว่า 1 คน
7. มีเครื่องมือทดสอบและตรวจดังนี้
 - ก. ชุดเครื่องมือตรวจสอบแนวเชื่อมเหล็ก
 - ข. เครื่องมือวัดความหนาโลหะ
 - ค. เครื่องมือทดสอบลึ้นนิริภัย
 - ง. เครื่องมือทดสอบเกจวัดความดัน
 - จ. เครื่องอัดน้ำความดันสูง
8. มีใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมประเภทนิติบุคคลจากสภาวิศวกร
9. ไม่เป็นหน่วยงานที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียนต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรมและยังไม่พ้นกำหนดระยะเวลา 3 ปี นับจากวันที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียน
10. เป็นหน่วยงานที่ผู้บริหารไม่เป็นบุคคลเดียวกับผู้บริหารของหน่วยงานที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียนต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม และยังไม่พ้นกำหนดระยะเวลา 3 ปี นับจากวันที่ถูกเพิกถอนการขึ้นทะเบียน
- 11.

10.6 การซ่อมแซมหม้อน้ำ

การซ่อมแซมโครงสร้างหม้อน้ำ ส่วนที่บกร่อง และดัดแปลงหม้อน้ำ ต้องกระทำตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง มาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำหรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน ปี พ.ศ. 2549 หมวดที่ 6

10.7 ขอบเขตการปฏิบัติงานของหน่วยรับรองวิศวกรด้านหม้อไอน้ำ

หน่วยรับรองวิศวกรด้านหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน” หมายความว่า นิติบุคคลที่มีขอบเขตการปฏิบัติงานอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง ดังต่อไปนี้

- 10.7.1 ตรวจสอบและรับรองแบบหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน
- 10.7.2 ตรวจพิสูจน์หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน ที่นำเข้าจากต่างประเทศตามหมวด 4 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อไอน้ำ ปี 2549 ข้อ 12
- 10.7.3 ตรวจสอบ ควบคุม กำกับดูแลการสร้าง การซ่อมแซม หรือดัดแปลง หม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อนให้เป็นไปตามแบบ และรายละเอียด ที่ผ่านการรับรองจากหน่วยงานรับรองวิศวกรรม ด้านหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน
- 10.7.4 ตรวจสอบแบบแปลนการติดตั้ง และการติดตั้งหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน และเครื่องอุปกรณ์ส่วนควบให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรม
- 10.7.5 ตรวจสอบ วิเคราะห์และจัดทำรายงานความปลอดภัยในการใช้งานของหม้อน้ำ หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พร้อมทั้งแนะนำวิธีการแก้ไขให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม

10.8 การบำรุงรักษาและการเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำมีความสำคัญมาก จุดประสงค์ไม่เพียงแต่การยืดอายุการใช้งานและคงสภาพและประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังมีความหมายรวมไปถึงความปลอดภัยและอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นในการใช้หม้อไอน้ำ

การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

- ก. ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ (fire Side) ซึ่งจะเริ่มต้นตั้งแต่ น้ำมันเชื้อเพลิงหรือเชื้อเพลิงอย่างอื่น ระบบส่งจ่ายเชื้อเพลิง ระบบควบคุมส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศ ห้องเผาไหม้ ชุดท้ายที่ปล่องทางออกของก๊าซร้อน
- ข. ส่วนที่เกี่ยวข้องกับน้ำ (Water Side) จะเริ่มต้นจากน้ำดิบที่จะป้อนให้กับหม้อไอน้ำ อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพน้ำ เครื่องอุ่นน้ำ และกำจัดออกซิเจน เครื่องสูบน้ำเข้าหม้อไอน้ำระบบควบคุม ระดับน้ำ ระบบควบคุมความดันไอน้ำ

นอกจากนั้น ยังมีส่วนย่อยที่รวมไปถึงระบบอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยของหม้อไอน้ำ ซึ่งส่วนนี้มีความสำคัญ ถ้าขาดการบำรุงรักษาจะก่อให้เกิดอันตราย และเสียหายอย่างมาก

การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำไม่ว่าจะส่วนใดก็ตาม ควรจะได้มีการวางแผนไว้เพราะการวางแผนที่ดี จะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อม และหลีกเลี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้น และสามารถทำให้หม้อไอน้ำทำงานได้อย่างปกติ การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำควรกำหนดเป็นเวลาที่แน่นอน และปฏิบัติเป็นประจำ อาจกำหนดเวลาเป็นการบำรุงรักษาประจำวัน ประจำสัปดาห์ ประจำเดือน ประจำหกเดือนและประจำปี ขึ้นอยู่กับการวางแผนการบำรุงรักษาและปฏิบัติ ส่วนใดของหม้อไอน้ำ

การเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการเผาไหม้ คือ วิธีการปฏิบัติการควบคุมการเผาไหม้ให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ที่สุด ปรับส่วนผสมระหว่างน้ำมันหรือเชื้อเพลิงกับอากาศให้เหมาะสม ตรวจสอบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ หรือออกซิเจนที่ออกมาที่ก๊าซร้อนทางปล่องไอเสียหรือตรวจสอบสีของควันไอเสีย

การเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทางด้านเกี่ยวกับน้ำ ก็เช่นเดียวกันน้ำดิบที่จะป้อนเข้าหม้อไอน้ำควรได้รับการปรับปรุงคุณภาพให้อยู่ในตามเกณฑ์มาตรฐานของหม้อไอน้ำ ควรเก็บตัวอย่างที่ใช้กับหม้อไอน้ำมาทำการตรวจสอบ การบำรุงรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำจะเป็นสิ่งที่ไปควบคู่กันเสมอ

10.8.1 การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำด้านที่สัมผัสกับน้ำ

เป็นการบำรุงรักษาภายในหม้อน้ำบริเวณที่สัมผัสกับน้ำปกติจะกระทำตั้งแต่ทุก 3 เดือนถึง 6 เดือน หรือทุกปี โดยตรวจสอบสภาพต่างๆ เช่น ความหนาตะกรัน การกัดกร่อน การผุกร่อน การบวม การข้อย การเสีรูป การแตกชำรุด เป็นต้น ได้สรุป ตัวอย่างของปัญหา สาเหตุตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ดังในตารางที่ 10.1

ตารางที่ 10.1 ตารางแสดงปัญหาต่างๆ ภายในหม้อน้ำ ด้านสัมผัสน้ำ พร้อมแนวทางแก้ไข

ปัญหา	สาเหตุ	การแก้ไข - ป้องกัน
1.มีตะกรันจับตามผิวสัมผัสไฟ เช่น ท่อน้ำ ท่อไฟ ผนังเตา	1.น้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีความกระด้างสูง มีสารละลาย เช่น Ca, Mg, CaCO_3 , MgCO_3 , CaSO_4 2.ขาดการบำรุงรักษา Softener ที่ถูกต้อง	1.ปรับสภาพน้ำให้เป็นน้ำอ่อน, เติมสารเคมี, ใช้ Condensate ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ, ขจัดตะกรันออกโดยการเคาะขัด หรือล้างน้ำยาเคมี (กรดเกลือกับ Armohib) 2.ล้าง Softener ด้วยน้ำเกลือตามเวลาที่เหมาะสม
2.มีตะกอนมาก, น้ำขุ่น, เกิดฟองหรือเกิดการเดือดพล่านในหม้อไอน้ำ	1.มีสารแขวนลอย เช่น ตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายหรือโคลน, สีหรือสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำมาก	1.มีการระบายน้ำทิ้งให้เหมาะสม(ครั้งละ 5 วินาที ไม่เกิน 8 ซม./ครั้ง) และปรับสภาพน้ำให้เหมาะสม, ปล่อยให้ตกตะกอน, การกรอง, การดูดซึมด้วยผงถ่าน, การทำน้ำอ่อน Demineralization และใช้น้ำ condensate
3.ส่วนที่สัมผัสน้ำผุ กัดกร่อนเป็นรูพรุน	1.น้ำเป็นกรด PH ต่ำกว่า 7 มี HCl, H_2SO_4 ละลายอยู่ในน้ำ 2.มี CO_2 ละลายอยู่ในน้ำ 3.มี O_2 ละลายในน้ำ 4.มีแร่ธาตุในน้ำ	1.ทำน้ำให้เป็นด่าง โดยการเติมสารเพื่อปรับ PH ให้มีค่าระหว่าง 9-11 2.แยกออกโดย Deaeration หรือทำให้เป็นกลาง โดยการเติมด่างหรือ Ammonia 3.แยกออกโดย Deaeration หรือเติมโซเดียมซัลไฟด์ Hydrasine
		4.แยกออกโดย Aeration, Cation exchange, ปล่อยให้ตกตะกอนหรือกรองน้ำ
4.มีการแตกร้าวในเนื้อโลหะ	1.น้ำเป็นด่างมากเกินไป มี NaCO_3 , $\text{Na(HCO}_3\text{)}$, $\text{Na(HO}_3\text{)}$ มาก 2.โครงสร้างรับแรงดันไม่แข็งแรง	1.Lime-Soda Softening, Demineralization, Anion exchange 2.ซ่อมเปลี่ยนหรือเสริมให้แข็งแรง
5.ไอน้ำมีน้ำปนมาก	1.น้ำในหม้อไอน้ำสกปรก มีสิ่งเจือปน	1.ถ่านน้ำทิ้งและเติมใหม่, กรองน้ำ

ปัญหา	สาเหตุ	การแก้ไข - ป้องกัน
	มาก 2.ท่อจ่ายไอน้ำเล็กเกินไป 3.มีการสูญเสียความร้อนที่ท่อจ่ายไอน้ำ มาก 4.มีน้ำกลั่นตัวในท่อพักรวม 5.เปิดเครื่องใช้ไอน้ำอย่างทันทีทันใด 6.หม้อไอน้ำเล็กเกินไป ผลิตไอน้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการ 7.ระดับน้ำในหม้อไอน้ำสูงเกินไป	2.เปลี่ยนท่อจ่ายไอน้ำให้ใหญ่ขึ้น 3.หุ้มฉนวน 4.ระบายน้ำทิ้ง, ติดตั้ง Steam Trap 5.เปิดวาล์วจ่ายไอน้ำช้าๆ 6.ลดปริมาณการใช้ไอน้ำหรือสลับกันใช้ไอน้ำ 7.ระบายน้ำทิ้ง, ป้อนน้ำเข้าหม้อไอน้ำในระดับที่พอดี, ติดตั้งสัญญาณเตือนระดับสูงเกินปกติ
6.ท่อไฟใหญ่ เพดานเตาหรือผิวสัมผัสไฟชำรุดบวม (เสียรูป)	1.น้ำในหม้อไอน้ำแห้ง 2.มีตะกรัน จับตามผิวสัมผัสไฟหนา 3.มีโคลน ตะกอนสะสมอยู่ในหม้อไอน้ำมาก 4.การออกแบบโครงสร้างไม่ถูกต้อง	1.ติดตั้งสัญญาณเตือนระดับน้ำต่ำกว่าปกติ 2.ขจัดตะกรันออก, ปรับคุณภาพน้ำให้เหมาะสม 3.ระบายน้ำทิ้งให้บ่อยขึ้น (ครั้งละ 5 วินาที ไม่เกิน 8 ชม./ครั้ง) 4.แก้ไขโครงสร้างใหม่ ปรึกษาวิศวกร

น้ำที่ไม่เหมาะสมหรือไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ น้ำจะมีสิ่งสกปรกต่างๆ ปนอยู่ในน้ำ ถ้าป้อนน้ำก็อาจเกิดตะกรันจับเกาะ การกัดกร่อน และ แครี่ โอเวอร์ (Carry - over) และทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังตารางที่ 10.1

ตะกรัน (Scaling)

สิ่งสกปรกในน้ำที่จับเกาะตามถังหรือภายในท่อน้ำเป็นชั้นๆ และแข็ง เรียกว่า ตะกรัน สำหรับส่วนที่ตกตะกอนอยู่ตอนล่างของถังมีลักษณะเป็นโคลนตม เรียกว่า สลัดจ์ (Sludge)

ตะกรันแข็งประกอบด้วย แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซิลิเกต เป็นส่วนใหญ่ ส่วนสลัดจ์ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมฟอสเฟต เป็นต้น

การเกิดตะกรัน เมื่อตะกรันจับเกาะที่ผิวส่งผ่านความร้อนเป็นชั้นๆ การส่งผ่านเลวลง มีผลให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตกต่ำลง

ถ้าสลัดจ์ถูกปล่อยทิ้งไว้ที่ก้นของถังเป็นเวลานานจนแข็งตัวขึ้น จะมีผลให้ล้นปล่อยทิ้งอุดตัน หรือถึงบางส่วนร้อนจัดเกินไปก็ได้

สำหรับการแก้ไขปัญหและการป้องกันนั้น ทำให้โดยปรับแต่งคุณภาพน้ำป้อน และควบคุมสิ่งสกปรกที่ปนอยู่ในน้ำให้มีค่าอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด นอกจากนี้สำหรับส่วนที่ไม่อาจจัดได้ด้วยวิธีปรับแต่งคุณภาพน้ำภายนอกหม้อไอน้ำ ก็ให้ดำเนินการโดยปรับปรุงคุณภาพน้ำภายในหม้อไอน้ำอีกทางหนึ่งด้วย

10.8.1.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

ประเภทของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับตัวหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ต่างๆ สามารถแยกออกได้เป็น การกัดกร่อนทั่วไป การกัดกร่อนเป็นจุด การกัดกร่อนเนื่องจากค่า และ การแข็งเปราะเนื่องจากโซดาไฟ

(ก) การกัดกร่อนทั่วไป

การกัดกร่อนทั่วไป เกิดจากการทำปฏิกิริยาของกลุ่ม OH^- ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของน้ำโดย Electrolytic Dissociation และไอออนของเหล็ก Fe^{2+} ซึ่งแยกตัวจากเหล็กมาละลายอยู่ในน้ำ ได้ตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ขึ้นมา ถ้า pH ของน้ำมีค่าสูง $\text{Fe}(\text{OH})_2$ จะละลายน้ำ นอกจากนี้ถ้าในน้ำมีออกซิเจนปนอยู่ก็จะกลายเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ในกรณีที่น้ำมีอุณหภูมิสูง $\text{Fe}(\text{OH})_2$ จะสลายตัวกลายเป็น Fe_2O_4 เหล็กเหนียวก็อาจถูกกัดกร่อนโดยไอออนที่มีอุณหภูมิสูงกลายเป็น Fe_2O_4 ได้ ในกรณีที่มีการคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ จะเกิด $\text{Fe}(\text{HCO})_3$ ได้ ในกรณีที่ pH ของน้ำมีค่าต่ำ หรือมีออกซิเจนละลายปนอยู่มากการกัดกร่อนจะดำเนินต่อไปอย่างรวดเร็ว

(ข) การกัดกร่อนเป็นจุด (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนเป็นจุด เป็นการกัดกร่อนโดยเกิดสนิมเป็นจุดๆ ตามผิวที่สัมผัสกับน้ำในหม้อไอน้ำ การกัดกร่อนมีลักษณะเป็นจุดเล็กๆ คล้ายกับรูที่เจาะด้วยเข็ม ลักษณะการเกิดเป็น Local Galvanic Action โดยมีเหนียวเป็นขั้วบวก OH^- ในน้ำ เกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ขึ้น นอกจากนี้ที่ด้านในและด้านนอกของชั้นตะกอนของสารที่เกิดจากการกัดกร่อนจะเกิดผลต่างของความเข้มข้นของออกซิเจนขึ้น ทำให้เกิด Local Galvanic Action โดยออกซิเจนขึ้น เข้มข้นและเจือจาง ซึ่งมีผลให้เกิดการกัดกร่อนเป็นจุดเล็กๆ ทั่วๆ ไป

(ค) การกัดกร่อนเนื่องจากค่า

เหล็กเหนียวก็กัดกร่อนได้ด้วยค่าๆ ถ้าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำสูงขึ้น $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวส่งผ่านความร้อนจะละลายออกมา ผิวของเหล็กเหนียวจึงถูกกัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ

10.8.1.2 การแข็งเปราะเนื่องจากโซดาไฟ (Caustic Embitterment)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะทวีความเข้มข้นในบริเวณช่องว่างเล็กๆ ที่ผิวส่งผ่านความร้อนของหม้อไอน้ำ และรวมตัวกับเหล็กออกไซด์ที่มีปะปนอยู่เกิดเป็นรอยร้าวตามแนวผิวเม็ดผลึก (Intercrystalline) ของเหล็กเหนียวปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแข็งเปราะเนื่องจากโซดาไฟ ส่วนใหญ่มักเกิดบริเวณที่มีแรงเค้น (Stress) รวมกันอยู่มากบนแผ่นเหล็กเหนียว (การเสียหาย) ในระบบน้ำป้อน ถ้า pH ของน้ำป้อนมีค่าต่ำหรือมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำมาก จะเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั่วไป

สำหรับหม้อไอน้ำนอกจากการกัดกร่อนทั่วไปแล้วยังมีปัญหการกัดกร่อนเป็นจุด การกัดกร่อนเนื่องจากด่าง และการแข็งเปราะเนื่องจากโซดาไฟอีกด้วย

เครื่องไอดง (Super Heater) จะเกิดการกัดกร่อนโดยไอน้ำ อุณหภูมิสูงหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งถูกพามาเนื่องจากการเกิดแครี่โอเวอร์

ในระบบน้ำควบแน่น pH ของน้ำจะลดต่ำลงและเกิดปัญหการกัดกร่อนทั่วไป นอกจากนี้ในกรณี pH สูงเนื่องจากการเติมสารเคมีในหม้อไอน้ำ เช่น แอมโมเนีย ไฮดรารซิน เป็นต้น ก็จะเกิดปัญหการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงได้

สำหรับการแก้ไขและการป้องกันนั้น จำเป็นต้องทำการปรุงแต่งคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสมทั้งภายนอกและภายในหม้อไอน้ำ โดยพยายามลดของแข็งและก๊าซที่ปนอยู่ในน้ำป้อนและน้ำในหม้อไอน้ำให้เหลือน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังต้องรักษาค่า pH ของน้ำให้เหมาะสมอีกด้วย

สำหรับการป้องกันการแข็งเปราะเนื่องจากโซดาไฟ เนื่องจากถ้าใช้โซเดียมคาร์บอเนต ในการปรับค่า pH ก็จะทำให้เกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ขึ้นได้ ดังนั้น จึงต้องใช้สารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดโซเดียมคาร์บอเนตอิสระขึ้นได้ โซเดียมฟอสเฟตหรือโซเดียมไนเตรท เป็นต้น นอกจากนี้ควรใช้สารป้องกันการแข็งเปราะเนื่องจากโซดาไฟอีกด้วย

10.8.1.3 แครี่ โอเวอร์ (Carry-over)

ถ้าภายในถึงเกิดการเป็นไออย่างรุนแรง น้ำในหม้อไอน้ำจะเป็นฟองและเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะถูกพาออกไปกับไอน้ำ ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า แครี่ โอเวอร์ แครี่ โอเวอร์ สามารถแยกออกตามสาเหตุการเกิดได้เป็น ไพรมิ่ง (Priming) (การเดือดของน้ำและไอฟพร้อมกัน) โฟมมิ่ง (Foaming) (การเกิดฟอง) และแครี่ โอเวอร์ของซิลิกา

(ก) ไพรมิ่ง (Priming)

การเพิ่มขึ้นของภาระอย่างฉับพลัน ระดับน้ำสูงเกินไป และความดันต่ำ ต่างก็มีผลให้หยดน้ำปนกับไอน้ำจะระเหิดและถูกพาออกไปนอกถึงเมื่อเกิดไพรมิ่งแล้ว และไอน้ำกับหยดน้ำถูกพาเข้าไปในท่อคองไอ ส่วนที่เป็นของแข็งจะแยกตัวออกมา ทำให้อุณหภูมิคงไอสู่ขึ้นยาก และเกิดการเสียหายอื่นๆ เช่น การกัดกร่อนได้

(ข) โฟมมิ่ง (Foaming)

ถ้าในหม้อไอน้ำมีของแข็งละลายปนอยู่มาก หรือมีน้ำมันและไขมันปนอยู่จะทำให้เกิดฟองจำนวนมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า โฟมมิ่ง ซึ่งช่วยทวีความรุนแรงของปรากฏการณ์ โฟมมิ่งอีกด้วย

(ค) แครีโอเวอร์ของซิลิกา

ถ้าความดันของไอน้ำมีค่าสูงยิ่งขึ้น อัตราการละลายของซิลิกาก็ยิ่งสูงขึ้นด้วย ซิลิกาที่ถูกพาออกไปโดยแครีโอเวอร์ จะเกาะจับเป็นของแข็งอยู่ตามในพืดของกังหันไอน้ำ ซึ่งถ้ามีปริมาณการจับเกาะมากขึ้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดการสั่นของกังหันได้

สำหรับการแก้ไขและการป้องกันนั้น การป้องกันจะแตกต่างกันออกไปตามสาเหตุของการเกิด ในการป้องกันโพรมิ่ง ตามปกติจะต้องระมัดระวังในการเดินเครื่องไม่ให้ภาระเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน นอกจากนี้ยังอาจจัดหยดน้ำที่เกิดขึ้นในถังโดยติดตั้งไซโคลนหรือสกรีน

โพรมิ่ง เกิดจากน้ำมันและไขมันหรือของแข็งปนอยู่ในน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องขจัดสารเหล่านี้เสีย

10.9 การควบคุมระดับน้ำในหม้อไอน้ำ

ในขณะที่ใช้หม้อไอน้ำ จะต้องรักษาระดับน้ำภายในหม้อไอน้ำให้ท่วมผิวสัมผัสไฟอยู่เสมอ ระดับน้ำในหลอดแก้วควรไม่สูงเกินไปเพราะจะทำให้ไอน้ำมีน้ำปนมาก มีสิ่งติดพาไปกับไอน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลง แต่ระดับน้ำก็ไม่ควรต่ำเกินไปเพราะอาจทำให้ผิวสัมผัสไฟบางส่วนเสียรูปได้ง่ายและเกิดอันตรายได้

หม้อไอน้ำที่ใช้เครื่องควบคุมระดับน้ำ เครื่องสูบน้ำจะทำงานเมื่อระดับน้ำต่ำและจะหยุดทำงานเมื่อระดับสูงถึงจุดที่ตั้งไว้ นอกจากนี้ถ้าระดับน้ำต่ำลงกว่าปกติจะตัดระบบป้อนเชื้อเพลิงและมีสัญญาณเตือนภัยปรากฏขึ้นเป็นเสียงไซเรน, เสียงกริ่ง, หรือปรากฏเป็นสัญญาณไฟ แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องควบคุมระดับน้ำนั้นเป็นเพียงอุปกรณ์อำนวยความสะดวกให้แก่เป็นอุปกรณ์ผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำเท่านั้น มิใช่เป็นอุปกรณ์ป้องกันน้ำแห้งที่มั่นใจได้ เพราะตัวเครื่องควบคุมระดับน้ำเองก็สามารถชำรุดขัดข้องได้ ฉะนั้นความปลอดภัยของหม้อไอน้ำจึงขึ้นอยู่กับความระมัดระวังในการดูแลและตรวจสอบของผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำเป็นสำคัญ

10.9.1 วิธีการทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมระดับน้ำ

10.9.1.1 วิธีทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมระดับน้ำที่ได้ผลแน่นอนคือ การทำให้เกิดสถานะน้ำแห้งจำลองขึ้น ซึ่งทำได้โดยการถ่ายน้ำออกจากหม้อไอน้ำทางวาล์วถ่ายน้ำอย่างช้าๆ ในขณะที่หม้อไอน้ำมีความดันปกติ การทดสอบวิธีนี้มีข้อจำกัดที่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนมาก และไม่มีอุปกรณ์ระบายน้ำที่เหมาะสม

10.9.1.2 การระบายน้ำได้เครื่องควบคุมระดับน้ำ วิธีนี้จะช่วยชำระล้างโคลน, ตะกอนที่สะสมอยู่ในท่อหรือเครื่องควบคุมระดับน้ำออกไป ป้องกันการอุดตันในระบบได้ แต่มีอาจบ่งชี้ว่าเครื่องควบคุมระดับน้ำสามารถทำงานได้เป็นปกติ

จะต้องทำการเปิดวาล์วได้เครื่องควบคุมระดับน้ำนี้ทุกวัน อย่างน้อยวันละครั้งเมื่อมีการตรวจสอบสภาพภายในเครื่องจะต้องถอดชุดควบคุมระดับน้ำมาล้างทำความสะอาดทุกครั้งก่อนที่ต่อจากชุดควบคุมระดับน้ำจะต้องปราศจากตะกอนและตะกอนอุดตัน

10.9.2 ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติ

เครื่องสูบน้ำไม่ทำงานเมื่อระดับน้ำต่ำ, หรือเครื่องสูบน้ำไม่หยุดทำงานเมื่อระดับน้ำสูง, สัญญาณเตือนระดับน้ำไม่ทำงานเมื่อระดับสูงหรือต่ำกว่าปกติ หรือสัญญาณเตือนทำงานทั้งๆ ที่ระดับน้ำปกติ มีสาเหตุจาก

- 10.9.2.1 ลูกลอยควบคุมระดับน้ำน้ำค้าง เนื่องจากมีตะกอนจับ
- 10.9.2.2 ท่อน้ำหรือท่อไอที่ต่อเข้าเครื่องควบคุมระดับน้ำอุดตัน หรือปิดวาล์วไว้
- 10.9.2.3 มีตะกอนจับที่แท่งอิเล็กโทรด (Electrode Holder) แตกร้าว หรือใส่ขั้วสลับกัน
- 10.9.2.4 สายไฟขาด หลวม ชำรุด
- 10.9.2.5 ระบบไฟฟ้าในตู้ควบคุมชำรุด
- 10.9.2.6 การติดตั้งปรับระดับไม่เหมาะสม
- 10.9.2.7 ลูกลอยควบคุมระดับน้ำชำรุด

10.9.3 ข้อเสนอแนะในการติดตั้งสัญญาณเตือนระดับน้ำในหม้อไอน้ำ

10.9.3.1 ความคันในการใช้งาน

(ก) แบบอิเล็กโทรด ความสามารถในการรับความดันขึ้นอยู่กับโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ติดตั้งอิเล็กโทรด

(ข) แบบลูกลอย แต่ละยี่ห้อ แต่ละรุ่น สามารถรับความดันได้ไม่เท่ากัน ควรเลือกใช้รุ่นที่สามารถทนความดันได้ไม่น้อยกว่าความดันสูงสุดในการใช้งานหม้อไอน้ำ

10.9.3.2 สภาพน้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

(ก) น้ำที่ผ่านการปรับสภาพและมีคุณสมบัติตามมาตรฐานกำหนด สามารถเลือกใช้ทั้งแบบอิเล็กโทรด ลูกลอย หรือแบบอื่นๆ

(ข) น้ำที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และคุณสมบัติที่ไม่ได้มาตรฐานที่กำหนดจะทำให้เกิดปัญหาดังนี้

1. แบบอิเล็กโทรด การทำงานปกติอาศัยน้ำเป็นตัวนำไฟฟ้าจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง การเคลือบของโคลน ตะกอนรอบๆ แท่งอิเล็กโทรด จะทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งอาจทำให้เครื่องส่งสัญญาณดังในขณะที่ยังมีระดับน้ำปกติ ปัญหานี้อาจทุเลาได้โดย 1. เลือกใช้ อิเล็กโทรดแท่งใหญ่ๆ 2. ถอดแท่งอิเล็กโทรดออกมาล้างทำความสะอาดบ่อยๆ
2. แบบลูกลอย การใช้งานควรมีการระบายน้ำที่ชุดลูกลอยทุกวัน มิฉะนั้นโคลน ตะกอนอาจทำให้ลูกลอยติดค้างได้ และควรถอดลูกลอยออกมาตรวจสอบและทำความสะอาดบ่อยอย่างน้อยปีละครั้ง

10.9.3.3 ระบบไฟฟ้า

ควรใช้ไฟฟ้ากระแสตรง แรงเคลื่อนต่ำซึ่งไม่เป็นอันตรายเมื่อไฟรั่ว ป้อนเข้าเครื่องอิเล็กทรอนิกส์หรือชุดกลอย และมีฝาครอบปิดมิดชิด

10.9.3.4 การตรวจสอบระบบการควบคุมหัวพันไฟ

ปกติระบบการควบคุมหัวเผา จะมี 2 หน้าที

- (ก) เริ่มเปิดสวิตช์เดินเครื่อง ในช่วงเวลาการไล่อากาศ หากตาไฟ (photo cell) ตรวจพบแสงไฟในห้องเผาไหม้ จะส่งสัญญาณเตือน หากไม่พบแสงไฟ เครื่องก็จะสามารถจุดเตาได้
- (ข) เมื่อเครื่องเดินตามปกติแล้ว ตาไฟจะตรวจการมีแสงไฟในห้องเผาไหม้ตลอดเวลา หากตรวจพบว่าไม่มีแสงไฟ มันจะส่งสัญญาณเตือน

ต้องตรวจสอบระบบตาไฟ (Photo cell) อย่างน้อยอาทิตย์ละครั้ง โดยการชักตาไฟออกมา ขณะเครื่องทำงานปกติ เครื่องจะต้องดับภายใน 12 วินาที หลังจากชักตาไฟออกแล้ว ถ้าเครื่องไม่ดับจะต้องตรวจสอบสาเหตุและแก้ไขทันที ชุดคอนแทกต่างๆ แมกเนติกสตาร์ทเตอร์ ต้องตรวจและทำความสะอาดตามสภาวะของการทำงานและสถานที่อย่างน้อยเดือนละครั้ง โดยใช้ลมเป่าอย่าลัดวงจรไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องเดิน จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบไฟฟ้าได้

10.9.3.5 ระดับน้ำที่สัญญาณเตือน

- (ก) สำหรับหม้อลูกหมู ควรติดตั้งให้สัญญาณดังที่ระดับน้ำสูงกว่าผิวท่อไฟใหญ่ประมาณ 6 นิ้ว การติดตั้งให้สัญญาณดังที่ระดับน้ำสูงเกินไป จะทำให้สัญญาณดังบ่อยๆ โดยไม่จำเป็น และไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำจะเป็นไอลิปก ซึ่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ แต่ถ้าติดตั้งให้สัญญาณดังที่ระดับน้ำต่ำเกินไป เมื่อน้ำต่ำกว่าระดับปกติอาจทำให้ผนังด้านท้ายหม้อไอน้ำชำรุดได้
- (ข) สำหรับเรือ, หม้อรถไฟ ควรติดตั้งสัญญาณดังที่ระดับน้ำสูงกว่าเพดานเตาประมาณ 4-6 นิ้ว
- (ค) สำหรับ Package Boiler ควรติดตั้งให้สัญญาณดังที่ระดับน้ำสูงกว่าท่อไฟเล็กประมาณ 4-6 นิ้ว

10.9.3.6 เครื่องควบคุมความดัน

- (ก) ต้องติดตั้งอย่างน้อย 1 ชุด จะต้องไม่มีวาล์วคันระหว่างหม้อไอน้ำ และเครื่องควบคุมความดัน ทำให้หน้าที่ส่งสัญญาณไปตัดวงจรการทำงานของหัวพันไฟ หรืออุปกรณ์เผาไหม้ เชื้อเพลิงแข็งแบบป้อนเชื้อเพลิง และป้อนอากาศอัตโนมัติ เมื่อความดันไอน้ำสูงถึงจุดที่ปรับตั้งไว้

(ข) ต้องทำการตรวจสอบทุก 1 เดือน และต้องทำการบำรุงรักษาหรือทำความสะอาดทุกปี ด้วยการใช้ผ้าทำความสะอาด พร้อมตรวจการชำรุดของสายไฟหรือกระจกและเข็ม ท่อที่ต่อมายังสวิตช์ควบคุมความดันก็ต้องทำความสะอาดด้วย

(ค) การทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมความดัน

การทดสอบขณะใช้งาน โดยการเพิ่มความดันไอน้ำ หากความดันไอน้ำสูงถึงจุดที่ปรับตั้ง สวิตช์จะตัดการทำงานของหัวพันไฟ หรือพัดลมป้อนอากาศ หากสวิตช์ไม่ทำงาน ความดันไอน้ำก็ยังสูงขึ้นเรื่อยๆ สูงจนถึงระดับที่ตั้งไว้ให้ลิ้นนิรภัยเปิดระบายไอน้ำ เพื่อลดความดัน

10.9.3.7 เครื่องสูบน้ำ

ต้องสามารถสูบน้ำป้อนหม้อไอน้ำที่ความดันได้ไม่น้อยกว่า 1.1 เท่าของความดันอนุญาตใช้งานสูงสุด (Maximum Allowable Working Pressure : MAWP) และอัตราการผลิตไอน้ำสูงสุด

การทดสอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำ

กระทำโดยการทำให้เกิดสภาวะน้ำแห้ง หรือจะกระทำอีกวิธีหนึ่งคือเปิดวาล์วใต้เครื่องควบคุมระดับน้ำ การทดสอบก็เหมือนกับทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมระดับน้ำจะต้องทำการทำงานทุกวัน และทำการบำรุงรักษา หรือทำความสะอาดทุกปี

ปัญหาเครื่องสูบน้ำที่พบบ่อยๆ ยกตัวอย่างเช่น

ลิ้นปิดวาล์วที่ท่อส่งหรือท่อดูดน้ำ
เกิดการอุดตันในท่อส่งหรือท่อดูดน้ำ
เครื่องสูบน้ำชำรุด

เครื่องสูบน้ำร้อนจัดเมื่อหยุดทำงาน มีสาเหตุจาก

วาล์วกันกลับที่ท่อส่งน้ำชำรุด หรือลื่นติดค้างเนื่องจากตะกรันหรือวัสดุอื่นๆ

คุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำต้องเป็นไปตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549 เป็นอย่างน้อย

10.10 การบำรุงรักษาด้านสัมผัสกับไฟ

เป็นการบำรุงรักษาด้านที่ผิวเหล็กสัมผัสกับไฟ บริเวณห้องเผาไหม้ ท่อไฟใหญ่ ท่อไฟเล็ก หรือผนังท่อน้ำ ควรกระทำทุก 3 เดือน ถึง 1 ปี เมื่อทำความสะอาด ผิวเหล็ก การตรวจสภาพต่างๆ เช่น การบกพร่องของท่อ ตลอดจนการชำรุดของอิฐปูนทนไฟ เป็นต้น

เขม่าบนผิวสัมผัสความร้อนทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้น เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ในกรณีของการใช้น้ำมันเตาที่มีกำมะถันปนอยู่ในเขม่า ซึ่งถ้ารวมตัวกับน้ำหรือไอน้ำ จะกลายเป็นกรด ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ ปกติอุณหภูมิของปล่องไฟไม่ควรต่ำกว่า 160°C และไม่ควรสูงเกิน 250°C

เนื่องจากเขม่าเป็นฉนวนกันความร้อนที่จะถ่ายเทจากไฟไปสู่ น้ำ ถ้าเขม่าหนา $1/32$ นิ้ว อาจทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มถึง 6.25 %

โดยปกติอุณหภูมิของน้ำหรือไอน้ำในหม้อไอน้ำ จะต่ำกว่าอุณหภูมิปล่องไอเสียไม่เกิน 80°C ถ้าหากเกินกว่านี้ แสดงว่าหม้อไอน้ำมีเขม่าหรือตะกรันหนา

10.10.1 การผุกร่อนของท่อและส่วนประกอบที่เป็นโลหะในเตา

การผุกร่อนมี 2 ลักษณะ คือ

10.10.1.1 การผุกร่อนที่อุณหภูมิต่ำมักพบในส่วน Convection Section ของเตาเผาและที่ปล่องไฟสาเหตุเกิดจากกำมะถัน ไตรออกไซด์ในแก๊สเสียอันเนื่องมาจากอากาศการเผาไหม้มีมากเกินไป และอุณหภูมิของแก๊สเสียลดต่ำกว่าจุดกลั่นตัวของกรดกำมะถัน ไอของกรดจึงกลั่นตัวลงบนผิวโลหะเกิดการกัดกร่อนขึ้น แก้ไขได้โดยลดอากาศสำหรับการเผาไหม้ลงและหุ้มปล่องไฟเพื่อป้องกันการเสียหายความร้อนออกไปอันจะทำให้ผิวปล่องเย็นกว่าจุดกลั่นตัวของไอกรดหรือทาด้วยสารกันการกัดกร่อนของกรดทั้งด้านในและด้านนอกตรงส่วนปลายของปล่อง ซึ่งอุณหภูมิจะเย็นกว่าจุดกลั่นตัวของไอกรด

10.10.1.2 การผุกร่อนที่อุณหภูมิสูงมักพบใน Radiant Section เกิดจากการสะสมตัวของสารประกอบของวานาเดียมและโซเดียมบนผิวโลหะที่ร้อน (ราว $540-590^{\circ}\text{C}$) การเกิดนั้นเนื่องมาจากไอของสารประกอบโซเดียมพอกตัวขึ้นก่อนบนผิวร้อนเกิดเป็นสารเหนียวจากนั้นไอของสารประกอบของวานาเดียมและสะสมโซเดียมจะสะสมตัวตามมา เกิดเป็นสารที่สามารถกัดกร่อนได้ ป้องกันได้โดยพยายามถ่ายน้ำออกจากถังเก็บน้ำมันเตาเป็นประจำน้ำสามารถละลายพวกเกลือโซเดียมออกมาได้ ดังนั้นไม่ควรปล่อยให้ไอน้ำมีโอกาสเข้าสู่หัวฉีด นอกจากนั้นยังควรตรวจสอบจำนวนอากาศที่เข้าหัวฉีดต้องไม่มากเกินไป การฉีดพ่นละอองน้ำมันควรละเอียด

10.10.2 ปัญหาที่พบบ่อยในการใช้น้ำมันเตา

การเกิดเป็นถ่านแข็งเกาะอยู่ตามผนังหรือท่อ มีสาเหตุดังต่อไปนี้

10.10.2.1 เปลวไฟถูกทำให้เย็นลงเกิดจาก

- (ก) เปลวไฟหรือไอน้ำมันชนผนังเตา ผิวท่อซึ่งเย็นทำให้อุณหภูมิลดต่ำกว่าจุดติดไฟเกิดเป็นเขม่าจับแข็งตัว
- (ข) ตำแหน่งหัวฉีดไม่ได้ศูนย์ในห้องเผาไหม้ ทำให้เปลวเอียงไปด้านใดด้านหนึ่งและชนขอบ
- (ค) ช่องบังกับทางลมชำรุด ผุกร่อน เคลื่อนหรือบิดงอจากสภาพเดิม ทำให้อากาศไม่สามารถผสมเข้ากับไอน้ำมันได้ดี

- (ง) การกระจายตัวของอากาศรอบๆ หัวฉีดไม่สม่ำเสมอ ด้านหนึ่งขาดอากาศอีกด้านหนึ่งมีอากาศมากเกินไป

10.10.2.2 การฟุ้งของหัวฉีดไม่ดีพอละอองน้ำมันเม็ดโตเกินไปและขนาดไม่สม่ำเสมอเกิดจาก

- (ก) ความชื้นในของน้ำมันไม่ได้ตามข้อบ่งใช้สำหรับหัวฉีด อาจสูงเกินไปหรือต่ำเกินไป เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันไม่ได้ที่ ควรตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำมันและตัวควบคุมอุณหภูมิ
- (ข) ความดันของน้ำมันเตา และ/หรือ ความดันของไอน้ำ/ลมต่ำไป ไม่ได้ตามข้อบ่งใช้ ควรตรวจสอบน้ำมัน หม้อกรองน้ำมันว่าตันหรือไม่
- (ค) หัวฉีดสึกกร่อน ชำรุด หรืออุดตัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหัวฉีดประเภทใช้ความดันตัวน้ำมัน เตาเองนั้น ร่องบนหัวฉีดมีความสำคัญต่อการฟุ้งของน้ำมันมาก หากร่องเกิดชำรุด หรือปิดเบี้ยว หัวฉีดจะไม่สามารถฟุ้งน้ำมันเป็นฝอยละเอียดได้ตามต้องการ การล้าง หัวฉีดจึงต้องระวังอย่าใช้ของแข็งขีดหรือแคะ

10.10.2.3 อากาศสำหรับเผาไหม้ไม่พอเพียง เกิดจาก

- (ก) ทางอากาศเข้าเตาเกิดอุดตัน
- (ข) อิฐทนไฟรอบๆ ชุดหัวฉีดพังลงมาปิดกั้นทางลม
- (ค) ทางดูดเข้าของพัดลมที่ใช้เป่าอากาศเข้าชุดหัวฉีดเกิดอุดตัน
- (ง) มีน้ำและของแข็งที่เผาไหม้ไม่ได้ปนอยู่ในน้ำมันเตามาก

10.10.3 สาเหตุการระเบิดภายในห้องเผาไหม้

- (ก) ลูกไฟดับเนื่องจากมีน้ำและอากาศปนอยู่ในระบบน้ำมันเข้าเครื่อง
- (ข) การไล่แก๊สภายในเครื่องก่อนการจุดน้ำมันนานพอ
- (ค) ความผิดพลาดประมาณของผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำ
- (ง) ระบบควบคุมน้ำมันโดยอัตโนมัติขัดข้อง
- (จ) วาล์วปิดน้ำมัน ปิดไม่สนิท น้ำมันรั่วเข้าหัวฉีด
- (ฉ) อัตราส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงขัดข้อง
- (ช) ระบบป้อนอากาศเผาไหม้ไม่ดี
- (ซ) ระบบจุดนำไฟขัดข้อง

10.11 การตรวจสอบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

เพื่อลดความเสี่ยงเชื้อเพลิง หรือเพื่อรักษาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำให้สูงสุดอยู่เสมอ ควรตรวจสอบและปรับปรุงระบบต่างๆ ดังนี้

- 10.11.1 ตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมสำหรับหม้อไอน้ำอยู่เสมอ การนำคอนเดนเสทกลับมาอุ่น น้ำที่จะป้อนเข้าหม้อน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 6 องศาเซลเซียส จะลดการสูญเสียเชื้อเพลิงลง 1%

- 10.11.2 อุณหภูมิของปล่องไฟ ถ้าขึ้นสูงกว่า 250°C เป็นเวลานานๆและไม่ยอมลดลงเลยแสดง ว่าจะต้องทำความสะอาดท่อไฟ ทำความสะอาดล้างตะกรันภายในเครื่อง ปรับแต่งหัวพ่นไฟ อาจชำรุดความร้อนจึงลดหรือ ลัดสุดดังกล่าวลง ทวนกันทางไฟระหว่าง Pass 1 กับ Pass3 หรือ Pass 2 กับ Pass 4 ปล่องไฟ อุณหภูมิที่ ปล่องไฟสูงมากแสดงถึงการสูญเสียความร้อนไปทางปล่องโดยเปล่าประโยชน์

สำหรับหม้อไอน้ำที่เชื้อเพลิงแข็ง และลมช่วยเผาไหม้อาศัยลมดูดจากปล่อง, ในกรณีที่อุณหภูมิปล่องไฟต่ำกว่า ปกติและควันท่ำ มีสาเหตุมาจาก

- 10.11.2.1 ปล่องควันทะลักเป็นรู หรือแตกร้าวเป็นร่องทำให้อากาศรั่วเข้าปล่องได้ ปริมาณลมช่วยเผาไหม้ลดลง
 - 10.11.2.2 อิฐทนไฟรอบหม้อไอน้ำ (แบบลูกหมู) มีการแตกร้าวเป็นร่องอากาศสามารถผ่านเข้าได้
 - 10.11.2.3 ฝาปิดก้นทางไฟด้านหน้า (หม้อเรือ) ปิดไม่สนิท มีอากาศรั่วเข้าได้
 - 10.11.2.4 ฝาปิดก้นทางไฟท้ายหม้อไอน้ำ (หม้อรถไฟ) ปิดไม่สนิท มีอากาศรั่วเข้าได้
 - 10.11.2.5 ความสูงของปล่องคว้นน้อยเกินไป ทำให้ลมดูดน้อย อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้
- 10.11.3 การตรวจสอบการเผาไหม้ โดยการวัดคาร์บอนไดออกไซด์ในปล่องไฟ เปรียบเทียบกับตาราง

ตารางที่10.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในปล่องไฟ

สภาพการใช้งาน	แก๊ส	น้ำมันโซล่า	น้ำมันเตา
A	10% CO ₂	12.8% CO ₂	13.8%CO ₂
B	9% CO ₂	11.5% CO ₂	13% CO ₂
C	8.5 % CO ₂	10% CO ₂	12.5% CO ₂
D	8% หรือน้อยกว่า	9% หรือน้อยกว่า	12% หรือน้อยกว่า

หมายเหตุ A=ดีที่สุด B= ดี C= พอใช้ D= ใช้ไม่ได้

10.12 การบำรุงรักษาช่องคนลอดและช่องมือลอด

การรั่วซึมที่ช่องคนลอดและช่องมือลอด เป็นเหตุให้เกิดการผุกร่อนอย่างรวดเร็วบริเวณฝาปิดช่องคนลอดและฝาปิดช่องมือลอด สาเหตุของการรั่วซึมมีดังนี้

- 10.12.1 ปิดช่องคนลอดหรือช่องมือลอดไม่แน่น ควรขันน็อตซ้ำหลังจากใช้งานไปสักระยะหนึ่ง
- 10.12.2 นำปะเก็นเก่ามาใส่อีก โดยปะเก็นนั้นไม่สามารถยึดหยุ่นตัวจึงกันรั่วไม่ได้
- 10.12.3 ค่อยปะเก็นไม่ถูกต้อง จึงมีการรั่วซึมบริเวณรอยต่อ
- 10.12.4 ใช้ปะเก็นไม่เหมาะสมกับหม้อไอน้ำ
- 10.12.5 ใส่ฝาช่องคนลอดหรือช่องมือลอดไม่ตรง ทำให้ขอบค้ำค้ำ ไม่สามารถขันน็อตให้ฝาแนบสนิทกับปะเก็นได้
- 10.12.6 ไม่ทำความสะอาดฝาช่องคนลอดหรือช่องมือลอดก่อนใส่ปะเก็นใหม่

10.13 การจัดทำบันทึกรายงานประจำวันของหม้อ

เพื่อให้การใช้งานหม้อไอน้ำมีความปลอดภัย มีประสิทธิภาพอยู่เสมอ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำจะต้องจัดทำรายงานประจำวันขึ้น รูปตารางที่ ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากรายงานจะเป็นสิ่งบอกเหตุถึงความผิดปกติของระบบต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถปรับปรุงแก้ไขความผิดปกติก่อนที่จะขยายตัวลุกลามจนทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงได้

ประโยชน์ที่ได้จากรายงานประจำวัน

- 10.13.1 ทำให้ทราบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง
- 10.13.2 อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ได้รับการดูแลอย่างต่อเนื่อง
- 10.13.3 ทำให้ทราบปริมาณการใช้ไอน้ำ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ
- 10.13.4 สามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้
- 10.13.5 สามารถกำหนดเวลาในการทำความสะอาดหม้อไอน้ำ

10.14 การเก็บรักษาหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานๆ จำเป็นต้องมีการเก็บรักษาให้ถูกวิธีทั้งด้านสัมผัสไฟและด้านสัมผัสน้ำ และต้องยกสวิตช์ไฟฟ้าทั้งหมดทั้งหมด

10.14.1 การรักษามันด้านสัมผัสไฟ

เพื่อป้องกันการผุกร่อนมันด้านสัมผัสไฟ จะต้องขัดเขม่าในห้องเผาไหม้ ท่อไฟและวัสดุทนไฟทั้งหมด

10.14.2 การรักษามันด้านสัมผัสน้ำ แบ่งได้ 2 แบบ คือ

10.14.2.1 การเก็บรักษาแบบแห้ง

ถ้าต้องการเก็บหม้อไอน้ำเกินกว่า 3 เดือน ต้องระบายน้ำทิ้ง เคาะ-ล้างตะกรันออกให้หมด และเป่าด้วยอากาศจนแห้ง แล้วใส่สารที่ดูดความชื้น เช่นปูนขาว (quick lime) ซิลิกาเจล (Silica gel) หรือ แอกติเวทเต็ด อลูมินา (Activated alumina) ลงไปในถาดแล้วใส่ไว้ข้างในหม้อไอน้ำ แล้วปิดฝาต่างๆ ที่เปิดอยู่เพื่อป้องกันความชื้นและอากาศเข้าไป ในกรณีหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งใช้ความดันสูง การเก็บแบบแห้งนี้จะอัดอากาศไนโตรเจน (N_2) เข้าไปในหม้อไอน้ำโดยเปิด Blow down valve ได้เตาเพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนไล่ก๊าซออกไปให้หมด และไล่ความชื้นออกไปด้วย จากนั้นจึงเปิด Blow down valve แล้วอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าหม้อไอน้ำ จนได้ความดันประมาณ 5 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว และพยายามรักษาความดันนี้ให้คงที่

หากหยุดการใช้หม้อไอน้ำเกิน 1 ปี ต้องทำการตรวจสอบความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำใหม่ ก่อนการใช้งาน

10.14.2.2 การเก็บรักษาแบบเปียก

ถ้าต้องการเก็บหม้อไอน้ำไม่เกิน 3 เดือน ให้เติมน้ำให้เกือบเต็ม เปิดวาล์วที่สูงที่สุดของหม้อไอน้ำแล้วเดินเครื่องจนเกิดไอน้ำชั่วขณะ จากนั้นเติมน้ำให้เต็มหม้อไอน้ำ แล้วเติมโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) หรือไฮดรารซีน (N_2H_4) ลงไปในน้ำให้มีความเข้มข้น 100 ppm (1.5 ปอนด์ของ Na_2SO_3 หรือ N_2H_4 ต่อ 100 แกลลอนของน้ำที่เติมเข้าไป) แล้วเติมโซดาคาไฟ (NaOH) เพื่อ

ทำให้เกิดสภาพเป็นด่าง มีความเข้มข้นประมาณ 400 ppm (3 ปอนด์ของโซดาไฟ ต่อ 1000 แกลลอนของน้ำ) เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำออกจนหมด

ตารางที่ 10.3 แบบบันทึกการประจำวันของหม้อไอน้ำ ชนิดเชื้อเพลิงเหลว

บันทึกการประจำวันของหม้อไอน้ำ

(สำหรับเชื้อเพลิงเหลว)

วันที่.....หม้อไอน้ำหมายเลข.....

เวลา	ชื่อผู้ควบคุม	ความดันไอน้ำ	ระดับน้ำในหลอดแก้วที่		ปริมาณน้ำเข้าหม้อไอน้ำ			เชื้อเพลิง				อุณหภูมิที่ปล่องไฟ	หมายเหตุ	
			1	2	ความดัน	อุณหภูมิ น้ำเข้า	ตัวเลขใน มิเตอร์	ความดัน	อุณหภูมิ		ตัวเลขใน มิเตอร์			อุณหภูมิที่ สั่งพัก
									ก่อน	หลัง				

ความดันไอน้ำโดยเฉลี่ย..... O กก / ตร.ซม. O บาร์ / ตร.น. ข้อสังเกต.....

อุณหภูมิที่ปล่องไฟโดยเฉลี่ย..... O เซลเซียส O ฟาร์เรนไฮต์.....

ปริมาณน้ำที่เข้าป้อนเข้าหม้อไอน้ำ..... ลบ. / ชั่วโมง (ลงชื่อ).....

ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้..... (ผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำทะเบียนผู้ควบคุมเลขที่..... หมดอายุ 31 ธ.ค.)

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้..... / ชั่วโมง

ตรวจสอบสัญญาณเตือนภัยเมื่อเวลา..... สภาพ O ปกติ O ไม่ปกติ มีปัญหา คือ.....

ตรวจสอบเครื่องควบคุมระดับน้ำเมื่อเวลา..... สภาพ O ปกติ O ไม่ปกติ มีปัญหา คือ.....

ตรวจสอบลิ้นนรภัยเมื่อเวลา..... สภาพ O ปกติ O ไม่ปกติ มีปัญหา คือ.....

ระบายน้ำ (Blow Down) ประมาณ..... วินาที จำนวนครั้งต่อวัน.....

หมายเหตุ ให้กรอกข้อความทุก 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 10.4 แบบบันทึกการประจำวันของหม้อไอน้ำ ชนิดเชื้อเพลิงแข็ง
บันทึกรายงานประจำวันของหม้อไอน้ำ
(สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง)
วันที่.....หม้อไอน้ำหมายเลข.....

เวลา	ชื่อผู้ควบคุม	ความดันไอน้ำ (Pressure)	ระดับน้ำในหลอดแก้ว		เชื้อเพลิงที่ ใช้ปริมาณ	เครื่องควบคุม ระดับน้ำ อัตโนมัติ	สัญญาณเตือน ภัย	อุณหภูมิที่ ปล่อย	สภาพการ ทำงานปั๊มน้ำ เข้าหม้อไอน้ำ	หมายเหตุ
			1	2						

เชื้อเพลิงที่ใช้.....

ระบายน้ำ (Blow Down) ประมาณ.....นาที จำนวน.....ครั้งต่อวัน

ความดันไอน้ำโดยเฉลี่ย.....

ตรวจสอบลิ้นไอน้ำ วันที่.....เวลา.....ตั้งไว้ที่ความดัน.....

หมายเหตุ ให้กรอกข้อความทุก 1 ชั่วโมง

สรุป การทำงานของหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ ☐ ปกติ ☐ ไม่ปกติ มีปัญหา คือ.....

(ลงชื่อ).....

(ผู้ควบคุมประจำหม้อไอน้ำทะเบียนผู้ควบคุมที่.....หมดอายุ 31ธ.ค.....)

10.15 ระยะเวลาในการตรวจสอบและบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

“อุบัติเหตุป้องกันได้ถ้าไม่ประมาท” ในการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ จึงจำเป็นต้องกำหนดระยะเวลาในการตรวจสอบและบำรุงรักษา ทั้งโครงสร้าง, ส่วนประกอบ และอุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อไอน้ำ ดังตัวอย่างในตารางที่ 10.6

ระยะเวลาในการตรวจสอบและบำรุงรักษาหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ต่างๆ ของแต่ละโรงงาน อาจจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์, คุณภาพของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ, สภาพการใช้งาน, ความดัน, อุณหภูมิและชนิดของเชื้อเพลิง เป็นต้น

สำหรับหม้อไอน้ำที่มีคำแนะนำจากบริษัทผู้ผลิต ให้ถือปฏิบัติตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเป็นสำคัญ

ตารางที่ 10. 5 สถิติอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในประเทศไทย เกือบทุกกรณีเป็นการระเบิดมีลักษณะการระเบิดจากความดันไอน้ำ (Steam Explosion) (ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

ว.ค.ป.	ชื่อโรงงาน/สถานที่	หม้อไอน้ำ		ผู้เสียชีวิต/บาดเจ็บ	ทรัพย์สินเสียหาย
		แบบ	อายุ (ปี)		
27 กพ.21	โรงไม้อัด/กทม.	รถไฟ	>10	24/20	10 ล้าน
15 ธค.21	โรงเลื่อยจักร/ชพ.	รถไฟ	53	2/8	1 แสน
19 พค.23	โรงกัวยเดี่ยว/สห.	ท่อไฟตั้ง ท่อน้ำขวาง	9	1/3	7 หมื่น
11 มิย.24	โรงสีข้าว/ชร.	ลูกหมู	>10	0/2	1 ล้าน
20 มิย.24	โรงปลาปน/สฎ.	รถไฟ	10	5/4	5 แสน
25 กค.24	โรงสีข้าว/กทม.	ลูกหมู	30	1/8	1 ล้าน
29 พย.24	โรงสุรา/สฎ.	รถไฟ	16	0/1	5.1 แสน
7 พย.25	โรงสีข้าว/นว.	ลูกหมู	40	2/3	2 ล้าน
7 สค.25	ผลิตเครื่องเรือน/ชบ.	Package	35	0/2	5 ล้าน
8 สค.26	โรงปลาปน/นศ.	รถไฟ	4	3/14	4 แสน
27 ธค.26	โรงเลื่อยจักร/พง.	รถไฟ	40	1/9	2 ล้าน
27 มีค.29	โรงสีข้าว/นึ่ง/ฉช.	Package	1	4/2	1 ล้าน
15 มค.31	โรงสีข้าว/ขก.	ลูกหมู	11	2/5	9 แสน
19 กพ.32	โรงสีข้าว/นฐ.	ลูกหมู	6	1/4	6 ล้าน
20 พย.32	โรงสีข้าว/ฉช.	ลูกหมู	11	0/4	2 ล้าน
พศ.2533	สับปะรดกระป๋อง/ปช.	Package	9	0/1	1.2 ล้าน
พศ.2533	โรงพยาบาล/กทม.	Package	7	0/0	6 แสน
พศ.2533	โรงกัวยเดี่ยว/นฐ.	ท่อน้ำขวาง	6	1/0	2 แสน
31 มีค.35	โรงสีข้าว/ลบ.	ลูกหมู	15	0/1	1.5 ล้าน

ว.ด.ป.	ชื่อโรงงาน/สถานที่	หม้อไอน้ำ		ผู้เสียชีวิต/บาดเจ็บ	ทรัพย์สินเสียหาย
		แบบ	อายุ (ปี)		
6 พค.35	โรงสีข้าว/พจ.	ลูกหมู	17	3/0	2 ล้าน
11 ธค.35	โรงฆ่าไก่/กทม.	ท่อไพนอน	5	1/10	3 แสน
4 พย.38	โรงสีข้าว/ชน.	ลูกหมู	14	0/1	6 แสน
มี.ค.2538	โรงถั่วเขียว/จบ.	ท่อนไผ่ขาว	8	1/0	5 หมื่น
24 พย.40	ฟอกย้อมผ้า/สส.	Package	12	1/0	1 ล้าน
13 กพ.41	โรงปั่นเส้น/รบ.	Package	10	0/2	1 ล้าน
พค.2543	พิมพ์ย้อมผ้า/นฐ.	Package	>10	1/0	1 ล้าน
พค.2543	สับปะรดกระป๋อง/ปจ.	Package	8	0/1	>1 ล้าน
ส.ค.2543	โรงอบไม้/สญ.	Package	10	0/1	>3 ล้าน
28 มี.ค.44	เพาะเห็ดฟาง/นฐ.	ถังนอน	30 น.	1/1	>5 แสน
เม.ย.2544	ผลไม้กระป๋อง/นพ.	Package	12	0/1	>6 ล้าน
ต.ค.2544	เยื่อกระดาษ/ปจ.	Glove Valve 8 นิ้ว	3	1/0	>5 แสน
23 พย.44	โรงถั่วเขียว/สป.	Package	3	1/2	>1 ล้าน
19 กพ.45	โรงพยาบาล/กทม.	ถัง Condensate	25	1/9	>5 ล้าน
7 กพ.46	ฟอกย้อมผ้า/สป.	Package	9	5/12	>2 ล้าน
15 มีค.46	เบหมีสำเร็จรูป/ปจ.	Package	6	0/0	>2 ล้าน
เม.ย.2546	โรงงานยาง/สส.	Package	7	0/0	1 แสน
ต.ค.2546	โรงถั่วเขียว/สส.	ท่อไพนอน	7 วัน	0/0	>2 แสน
ต.ค.2546	ร้านน้ำเต้าหู้/กทม.	หม้อต้มน้ำเต้าหู้	1 ค.	1/1	5 แสน
ก.พ.2547	โรงถั่วเขียว/กทม.	ท่อไฟตั้ง หม้อน้ำขาว	14 วัน	0/0	1 แสน
2547	โรงแยกก๊าซ/รย.	Water Tube	>5	0/0	>50 ล้าน
เม.ย.2547	อาหารทะเลแช่แข็ง/สส.	Package	5	0/0	6 ล้าน
12 มีค.48	อาหารทะเลแช่แข็ง/สข.	Package	3	0/7	22 ล้าน
13 เม.ย. 49	โรงฟอกย้อม	Package	1/2ปี	-	3.5 ล้าน
29 เม.ย. 49	โรงงานแป้งมัน	Water Tube Boiler	30 วัน	0/0	70 ล้าน
28 มิ.ย. 49	โรงกลั่นสุราพื้นบ้าน	ถังตัดแปลง	1	0/2	1 แสน
26 กค.48	ผลิตถุงมือยาง/สข.	Package	5	0/7	30 ล้าน
21 ก.ย. 49	โรงเพาะเห็ด	ถังตัดแปลง	1	1/2	0.3 แสน

ตารางที่ 10.6 แสดงระยะเวลาสำหรับตรวจสอบและบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

ระยะเวลา สิ่งที่ต้องบำรุงรักษาหรือตรวจสอบ	1 วัน	7 วัน	1 เดือน	3-6 เดือน	1 ปี
หลอดแก้วแสดงระดับน้ำ, วาล์วและท่อ	o			●	
วาล์วถ่ายน้ำทิ้ง	o			●	
เครื่องควบคุมระดับน้ำแบบอิเล็กทรอนิกส์	o			●	
เครื่องควบคุมระดับน้ำแบบลูกลอย	o			●	
สัญญาณเตือนภัยเมื่อระดับน้ำผิดปกติ	o				●
เกจวัดความดันและท่อเข้าเกจ			o		●
สวิทช์ควบคุมความดัน			o		●
คุณสมบัติของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	o				
เครื่องปรับปรุงคุณภาพน้ำ		o		●	
เครื่องสูบน้ำ		o		●	
วาล์วกันกลับ			o		
ลิ้นนิรภัย		o		●	
ชุดหัวฉีด		o		●	
ตาไฟ (Photo Cell)		o		●	
กระจกส่องดูการเผาไหม้			o	●	
อุปกรณ์อุ่นน้ำมัน		o		●	
ไส้กรองน้ำมัน			o	●	
ถังเก็บน้ำมัน			o		●
ท่อน้ำ, ท่อไฟ, เพดานเตาด้านสัมผัสไฟ				o	●
อิฐทนไฟ, ฉนวนกันความร้อน				o	●
ปลั๊กหลอมละลาย				o	●
เหล็กยึดโยง				o	●
ฝาทอย, ช่องทำความสะอาด				o	●

ระยะเวลา สิ่งที่ต้องบำรุงรักษาหรือตรวจสอบ	1 วัน	7 วัน	1 เดือน	3-6 เดือน	1 ปี
ถังพักไอน์				0	●
อุปกรณ์แยกน้ำ				0	●
เครื่องดักไอน์ Steam Trap				0	●
ความปลอดภัยหม้อไอน์น้ำ					●

หมายเหตุ O หมายถึง การตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ เช่น การระบายน้ำ, การระบายไอน์, การอัดน้ำ ฯลฯ

● หมายถึง การบำรุงรักษา, การปรับปรุงแก้ไข, การทำความสะอาด การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ ฯลฯ

10.16 การวางแผนการบำรุงรักษา

การวางแผนการบำรุงรักษาที่ดีควรจัดช่วงจังหวะการบำรุงรักษาออกเป็นช่วงๆและให้สัมพันธ์กับการผลิตของโรงงาน เพื่อจะได้ไม่กระทบกระเทือนการผลิตของโรงงาน ช่วงเวลาการบำรุงรักษาควรแบ่งดังนี้

10.16.1 การบำรุงรักษารายวัน

10.16.2 การบำรุงรักษารายสัปดาห์

10.16.3 การบำรุงรักษารายเดือน

10.16.4 การบำรุงรักษาตอนสิ้นปี

10.16.1 การบำรุงรักษารายวัน

เป็นการกำหนดงานที่จะต้องปฏิบัติในแต่ละวัน ซึ่งมีดังนี้

10.16.1.1 ระบายน้ำในหลอดแก้วระดับน้ำ

10.16.1.2 ระบายน้ำในลูกกลอยควบคุมระดับน้ำ

10.16.1.3 ระบายน้ำจากใต้หม้อน้ำ (Blowdown)

10.16.1.4 ตรวจระดับน้ำมันเครื่องของปั๊มลม (ถ้ามี)

10.16.1.5 บันทึกประจำวัน

10.16.1.6 สังเกตดูพวกเกจต่างๆว่าวัดค่าต่างๆอยู่ในเกณฑ์ปกติหรือไม่

10.16.2 การบำรุงรักษารายสัปดาห์

งานที่จะต้องปฏิบัติ มีดังนี้

10.16.2.1 ทำความสะอาดหัวฉีด

10.16.2.2 ทำความสะอาดเตาไฟ

10.16.2.3 ทำความสะอาดไส้กรองน้ำมัน

10.16.2.4 ตรวจสอบปะเก็นฝาหม้อไอน์ว่ามีรอยรั่วของไอน์เสียหรือไม่

- 10.16.2.5 ตรวจสอบปะเก็นฝาห้องคนลอยหรือช่องมือลอยว่ามีรอยรั่วซึมหรือไม่ ถ้ามีจะเห็นเป็นเกลียวเกาะที่ฝาห้องคนลอยหรือช่องมือลอยเป็นก้อน ควรขันน็อตให้แน่นหรือถ้ายังไม่หายก็ให้เปลี่ยนปะเก็นใหม่
 - 10.16.2.6 ทำความสะอาดกระจกมองไฟ
 - 10.16.2.7 ทำความสะอาด และตรวจสอบระยะเช็วหัวเทียน
 - 10.16.2.8 ทดสอบระบบควบคุมความปลอดภัย
 - ลูกลอยควบคุมระดับน้ำ
 - สวิตช์ควบคุมความดัน
 - 10.16.2.9 เปลี่ยนน้ำในหม้อไอน้ำ (ถ้ามีเวลามากพอที่จะทำได้)
 - 10.16.2.10 วัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปรับแต่งให้ได้ค่าสูงสุด
- 10.16.3 การบำรุงรักษารายเดือน
- 10.16.3.1 ล้างถังเก็บน้ำก่อนเข้าปั้มน้ำ
 - 10.16.3.2 ล้างไส้กรองน้ำก่อนเข้าปั้มน้ำ
 - 10.16.3.3 ทำความสะอาดท่อไฟ (ล้างเขม่าออกโดยใช้แปรง)
 - 10.16.3.4 ตรวจสอบสภาพอิฐทนไฟ วัสดุทนไฟ ปะเก็นฝาหม้อไอน้ำ
 - 10.16.3.5 ล้างทำความสะอาดภายในหม้อไอน้ำ (ด้านสัมผัสน้ำ) โดยใช้ น้ำความดันสูงฉีดเอาตะกรันและตะกอน
 - 10.16.3.6 ล้างลูกลอยควบคุมระดับน้ำล้าง เอาตะกอนที่ตกในห้องลูกลอยและตามข้อต่อออก
 - 10.16.3.7 ตรวจสอบระบบกลไกของลูกลอยว่าทำงานได้โดยไม่ติดขัด
 - 10.16.3.8 ทดสอบระบบกลไกของลูกลอยว่าทำงานได้โดยไม่ติดขัด
 - 10.16.3.9 ทำความสะอาดพวกเครื่องควบคุมไฟฟ้า อย่าให้มีฝุ่นเกาะมากโดยใช้ลมแห้งเป่า
 - 10.16.3.10 ทดสอบลื่นนิรภัยว่าทำงานคืออยู่หรือไม่
- 10.16.4 การบำรุงรักษาตอนสิ้นปี
- 10.16.4.1 ตรวจสอบสภาพลื่นนิรภัยว่ารั่วหรือไม่ทำงานตรงตามค่าความดันที่กำหนดหรือถ้าไม่ดีจะต้องเปลี่ยนหรือซ่อม
 - 10.16.4.2 ตรวจสอบสภาพวาล์วทุกตัวว่ายังทำงานได้ดีหรือไม่ ปิดได้สนิทหรือไม่
 - 10.16.4.3 ตรวจสอบสภาพลูกปั้มนมอเตอร์ทั้งหมด ลูกปั้มน้ำ ถ้าเสียหายหรือสึกหรอมากควรเปลี่ยนใหม่
 - 10.16.4.4 ทำความสะอาดภายในหม้อไอน้ำ (ด้านสัมผัสน้ำ) โดยการกำจัดตะกรันที่เกาะแข็งตัวอยู่ออกให้หมด

10.17 สาเหตุหม้อไอน้ำระเบิด

จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบบริเวณที่เกิดเหตุหม้อไอน้ำระเบิด ทำให้ทราบว่าสาเหตุของหม้อไอน้ำระเบิดนั้น อาจเกิดขึ้นด้วยสาเหตุหนึ่งหรือหลายสาเหตุ ดังต่อไปนี้

- 10.17.1 ความบกพร่องในการออกแบบ การสร้าง การติดตั้ง และการซ่อมหม้อไอน้ำ

- 10.17.2 วัสดุที่นำมาใช้สร้างไม่เหมาะสม
- 10.17.3 ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ถูกต้องตามข้อกำหนดของอุปกรณ์นั้น ๆ
- 10.17.4 ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำมีความรู้ในการปฏิบัติงานควบคุมหม้อไอน้ำด้วยความปลอดภัยไม่เพียงพอ
- 10.17.5 ขาดการวางแผนตรวจสอบและการบำรุงรักษา โครงสร้าง ส่วนประกอบ และอุปกรณ์ความปลอดภัย
- 10.17.6 น้ำที่ใช้สำหรับหม้อไอน้ำมีคุณสมบัติไม่เหมาะสม
- 10.17.7 ใช้งานหม้อไอน้ำที่ความดันสูงกว่า วิศวกรรับรองความปลอดภัยกำหนดไว้หรือมีการปรับตั้งลิ้นรัยให้ไอน้ำระบายสูงเกินไป
- 10.17.8 หม้อไอน้ำไม่ได้รับการตรวจสอบความปลอดภัยการใช้งานประจำปีจากวิศวกร

10.18 เอกสารอ้างอิง

- 10.18.1 กรมโรงงานอุตสาหกรรม , คู่มือการควบคุมหม้อไอน้ำ , โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย , 2535
- 10.18.2 Mr.Yoshihiko Takamura , คู่มือเทคนิคประหยัดพลังงาน สำหรับหัวหน้างานและวิศวกร ภาควิชาความร้อน, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) , 2525
- 10.18.3 เอกสารประกอบการสัมมนา Boiler and Pressure Vessel Inspection Technology and Approve System in Japan , ก.พ. 1998
- 10.18.4 เอกสารประกอบการสัมมนา Professional Boiler In Section march , 1999
- 10.18.5 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง มาตรการความปลอดภัย เกี่ยวกับหม้อน้ำ และหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน และ พ.ศ. 2549

หน่วยที่ 11 การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

การวางแผนบำรุงรักษาระบบหม้อไอน้ำ โดยเฉพาะเครื่องกำเนิดไอน้ำ จะช่วยลดการสูญเสียในกระบวนการใช้ไอน้ำ หรือกระบวนการผลิตต่างๆ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากการหยุดการใช้งานนอกแผน ซึ่งในหน่วยนี้จะกล่าวถึงการป้องกันการหยุดใช้งานนอกแผน โดยจะอธิบายปัญหาซึ่งเกิดจากการใช้งานนอกแผน การตรวจสอบและการวางแผนการดำเนินงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจ ในการจัดทำแผนการซ่อมบำรุงหรือการดำเนินแก้ไขตามมาตรฐาน เพื่อนำไปสู่การใช้งานได้อย่างปกติและมีประสิทธิภาพ

11.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางในการจัดทำแผนการซ่อมบำรุงหม้อไอน้ำให้ระบบการทำงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

11.2 ขอบเขตและนิยาม

11.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตของการบำรุงรักษาเฉพาะหม้อไอน้ำแบบท่อและหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ โดยเป็นข้อแนะนำในการกำหนดแผนปฏิบัติงาน เพื่อให้การปฏิบัติงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

11.2.2 นิยาม

การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ หมายถึง การตรวจสอบและวางแผนงานการใช้งานหม้อไอน้ำให้สามารถทำงานได้อย่าง ได้ปกติ โดยมีการจัดทำขั้นตอนปฏิบัติงานที่ชัดเจน มีผลกระทบต่อการหยุดงานนอกแผนน้อยที่สุด

11.3 การวางแผนงานบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

การวางแผนซ่อมบำรุงหม้อไอน้ำที่ดีมักเกิดจากปัจจัยสำคัญๆ อาทิ

11.3.1 ขั้นตอนการปฏิบัติงานตรวจสอบ (Overhaul Procedures)

11.3.2 แผนการตรวจซ่อม (Overhaul Scheduling)

11.3.3 การเตรียมการด้านอะไหล่ และประวัติเครื่องจักรอุปกรณ์

11.3.4 การฝึกอบรมบุคลากร

11.3.5 แนวคิดในเรื่องการพัฒนา ปรับปรุงเครื่องจักรอุปกรณ์

11.3.1 ขั้นตอนการตรวจซ่อม

ข้อมูลที่ต้องจัดเตรียมและมีไว้ใช้งานควรมีการดำเนินการในส่วนของ

ก. ข้อมูลของเครื่องจักร อุปกรณ์ที่มีการเดินใช้งานอยู่ก่อนงานตรวจซ่อม

ข. ข้อมูลของเครื่องจักร อุปกรณ์ที่หยุดใช้งาน

ค. ข้อมูลของเครื่องจักร อุปกรณ์ที่มีการเดินทดสอบ และเดินใช้งานหลังงานตรวจซ่อม

11.3.2 แผนการตรวจซ่อม

การวางแผนงานบำรุงรักษาจะต้องกำหนดขึ้นให้สอดคล้องกับแผนการผลิต ข้อกำหนดของเครื่องจักร อุปกรณ์ สมรรถนะ ตลอดจนประสิทธิภาพของผู้ปฏิบัติงาน แผนงานควรมีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเป็น

11.3.3 การเตรียมการด้านอะไหล่และประวัติเครื่องจักรอุปกรณ์

การเก็บประวัติชิ้นส่วน อุปกรณ์ จะทำให้ทราบถึงคุณภาพการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีจำนวนมากมาย และความสำคัญที่แตกต่างกัน การมีระบบการจัดเก็บประวัติอุปกรณ์ทำให้ทราบถึงชิ้นส่วนที่ต้องเตรียมไว้สำหรับการใช้งานในการเปลี่ยน แก๊สช่วงหยุดเครื่องในโอกาสต่อไป ทำให้ระบบการจัดการอะไหล่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

11.3.4 การฝึกอบรมบุคลากร

การฝึกอบรมบุคลากรทั้งในส่วนของงานเดินเครื่องและบำรุงรักษา ให้สามารถดูแลเครื่องจักร อุปกรณ์ ให้ใช้งานได้ตามออกแบบ สามารถบ่งชี้ แจ้งเตือน วางแผนในการตรวจ ซ่อมอุปกรณ์ในการหยุดเครื่องครั้งต่อไป จะลดโอกาสของความสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ รวมทั้งสามารถในการตัดสินใจหยุดอุปกรณ์ เพื่องานบำรุงรักษาอย่างทันทั่วที่ อาจลดความสูญเสียให้ลดน้อยลงได้

11.3.5 แนวคิดเรื่องการพัฒนา ปรับปรุงเครื่องจักรอุปกรณ์

ควรมีการวิเคราะห์ วางแผน ดำเนินการในการพัฒนา ปรับปรุงอุปกรณ์ทั้งที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ เครื่องจักรที่เสียหายจากการทำงาน หรือการดำเนินการในช่วงหยุดเครื่อง ตรวจสอบสภาพตามวาระ

11.4 การดูแลรักษาหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ และหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ซึ่งความแตกต่างกันนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำแต่ละประเภทก็มีความแตกต่างกันตามขนาดกำลังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิ ความดัน เชื้อเพลิง น้ำป้อน เป็นต้น

11.4.1 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำที่ผลิตและติดตั้งหน้างาน (field erected) หรือเป็นหม้อไอน้ำประกอบเสร็จ (package) มีวิธีการดูแลรักษาความดันแนะนำของบริษัทผู้ผลิต โดยมีรายการหลัก ดังตารางที่ 11.1 ดังนี้

ตารางที่ 11.1 วิธีการดูแลรักษาความดันแน่นของบรืษผู้ผลิต

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
Drums, Headers และ Tubes (ด้านที่สัมผัสกับน้ำ)	1) ตรวจสอบการผุกร่อน (corrosion) ตะกรัน (scale) การกัดกร่อน (pitting) และการสึกกร่อนตามส่วนต่างๆ 2) ทำความสะอาดรอบประตูลงเปิด (Manhole) ปรับผิวให้เรียบและเปลี่ยนปะเก็น 3) ตรวจสอบการผุกร่อน การเกิดตะกรัน การสึกกร่อน และความแข็งแรงของจุดยึดต่างๆ ของอุปกรณ์แยกน้ำ (ออกจากไอน้ำ) ใน Drum 4) ตรวจสอบระบบการป้อนสารเคมี ท่อทางของ Line Blow Down ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน 5) ตรวจสอบข้อมูลการยึดตัวของ Drum และ Headers 6) ตรวจสอบการกัดกร่อน การสึกกร่อน ตะกรันสะสม รอยแตกหรือแยกบริเวณผิวท่อของท่อน้ำ 7) ทำการเปลี่ยนปะเก็น ประตูลงเปิด (Hand hole) และหรือตะปูเกลียวยึด (Stud Threads) 8) ตรวจสอบสภาพผิวท่อ รวมทั้งการสุ่มตรวจ วิเคราะห์ผลทางด้านโลหะวิทยาในจุดที่เคยเกิดปัญหา หรือ คาดว่าจะเกิดปัญหา
Drums, Headers และ Tubes (ด้านที่สัมผัสกับการสันดาป)	1) ตรวจสอบสภาพภายนอกของ Drum และ Header ดูสภาพการกัดกร่อน การสึกกร่อน ร่องรอยของ Overheat ตลอดจนรอยแตก รอยแยกของผิว 2) ตรวจสอบฉนวนรอบ Drum และแก้ไขหากพบการชำรุด 3) ตรวจสอบการรั่ว ความเสียหายของ Seal ที่จุดต่างๆ ของ Drum และ Header หากมีต้องทำการแก้ไขหรือเปลี่ยน 4) ตรวจสอบจุดยึดและความแข็งแรงโดยรวมของ Drum และ Header รวมทั้งขนาดและทิศทางการขยายตัว 5) ตรวจสอบระบบจับยึด และการขยายตัวของระบบ Blow down ท่อทางต่างๆ ที่ต่อกับ Drum และ Header 6) ตรวจสอบสภาพภายนอกของ Tube และหรือ Fin ในระบบว่ามีความผิดปกติหรือไม่ รวมทั้งระบบการกักเชื้อจากระบบ Soot Blower
Super heater	1) ตรวจสอบ Super Heater Header และ Tubes ในส่วนที่อาจเกิดการกัดกร่อน การสึกกร่อน หรือ Overheat 2) ตรวจสอบการกัดกร่อน สึกกร่อนของท่อบริเวณที่อยู่ใกล้ระบบ Soot 3) ตรวจสอบทิศทางการขยายตัว หดตัวของ Headers และ Tubes 4) ตรวจสอบความมั่นคง ปลดล๊อคของท่อ Vent และ Drain ในระบบ 5) ตรวจสอบการจับยึดของ Header และ Tube ว่ามั่นคงปลดล๊อค

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
Economizer	1) ตรวจสอบการสึกกร่อน การเกิด Oxygen Pitting และ Scale ภายใน Headers และ Tubes 2) ตรวจสอบการกัดกร่อน สึกกร่อน และสิ่งสกปรกตกค้าง ด้านนอกของ Headers และ Tubes รวมถึงบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากระบบ Soot 3) ตรวจสอบความมั่นคง ปลอดภัยของท่อ Vent และ Drain ในระบบ 4) ตรวจสอบการรั่วไหลของ Flue Gas ผ่านประตูเข้าออกของห้อง Economizer รวมทั้งฉนวนรอบนอก 5) ตรวจสอบการรั่วไหลของวาล์วน้ำในระบบ 6) ตรวจสอบการจับยึดของ Header และ Tube ว่ามั่นคงปลอดภัย
อุปกรณ์แสดงระดับน้ำ	1) ตรวจสอบการรั่วซึมความสะอาด ความชัดเจนในการมองเห็นของอุปกรณ์แสดงระดับน้ำ 2) ตรวจสอบความสว่าง อุปกรณ์สะท้อนแสง และกระจกที่สามารถใช้งานได้ปกติ 3) ตรวจสอบระบบเปิด-ปิดน้ำเข้าอุปกรณ์แสดงระดับน้ำ ทั้งในส่วนของวาล์วน้ำโซคิง (หากใช้) ว่าสามารถใช้งานได้ปกติ 4) ตรวจสอบว่าอุปกรณ์แสดงระดับน้ำสามารถขยายตัว หดตัวได้สะดวก 5) ตรวจสอบท่อ ข้อต่อเข้าอุปกรณ์แสดงระดับน้ำมีสภาพปกติ ไม่รั่วซึม ไม่มีสิ่งสกปรกอุดตัน ตลอดจนมีฉนวนกันความร้อนเรียบร้อยสมบูรณ์ 6) ตรวจสอบว่าสัญญาณแจ้งระดับน้ำสูงหรือต่ำกว่าที่กำหนดไว้สามารถใช้งานได้ปกติ
วาล์วป้อนน้ำเข้าหม้อไอน้ำ	1) ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำ การทำงานของวาล์วสามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบ 2) หากจำเป็นต้องถอด รื้อ ควรปรึกษาริษัทผู้ผลิตก่อนดำเนินการ
ระบบทำความสะอาดท่อ (Soot Blowers)	1) ตรวจสอบระบบความมั่นคง การยึดจับของตัว Soot Blower 2) ตรวจสอบชิ้นส่วนต่างๆ ของ Soot Blower เช่น Hanger Bearing, Soot Blower Nozzle, จุติรองรับการเสียดสีของท่อ Soot, รอยร้าวส่วนเสียหายต่างๆ, ความราบรื่นในการเคลื่อนที่ของตัว Soot และระบบหล่อลื่น 3) ตรวจสอบวาล์ว ส่วนที่เคลื่อนที่ต่างๆ 4) ตรวจสอบชิ้นส่วนต่างๆ และระบบท่อเพื่อค้นหาการสึกกร่อน กัดกร่อน 5) ตรวจสอบทิศทางการพ่นของ Steam และมุมของการพ่นทำความสะอาด 6) ตรวจสอบการรั่วซึมของไอน้ำในระบบ 7) ตรวจสอบระบบของท่อไอน้ำในระบบ รวมทั้งความเอียงของท่อวางไว้อย่างถูกต้อง 8) ตรวจสอบร่องรอยของการ Overheat ในระบบ
วาล์วในระบบ	ตรวจสอบสภาพและการทำงานของวาล์วต่างๆ ในระบบป้อนน้ำ

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
	ระบบระบายน้ำทิ้ง ระบบทิ้งน้ำ (Drain) และในระบบอื่นๆ ทำการแก้ไข เปลี่ยน ซ่อมตามความจำเป็น
วาล์วความปลอดภัย	กรณีที่พบความผิดปกติของการทำงานของ Safety Valve ในช่วงทดสอบ ก่อนหยุดเดินหม้อไอน้ำ จะต้องมีการดำเนินการแก้ไขโดยช่างผู้ชำนาญงาน • ตรวจสอบ Valve Nozzle และ Disk Seat ทำการบดบ่าวาล์วตามคำแนะนำของผู้ผลิต • ตรวจสอบชิ้นส่วนภายในของวาล์ว คุณภาพ การกัดกร่อน สึกกร่อน และรอย แก้ไขหรือเปลี่ยนตามคำแนะนำของผู้ผลิต • ตรวจสอบส่วนประกอบของ Valve Springs ถึงการสึกกร่อน แดกร้าว ความยืดหยุ่นของ Spring • ตรวจสอบแกนวาล์วไม่คดงอ เสียรูป รวมทั้งเกลียวปรับสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ • ตรวจสอบท่อออกของไอน้ำ และท่อ Drain น้ำว่ามีความปลอดภัย สามารถขยายตัว หดตัวได้ปกติ • ทดสอบการทำงานของวาล์วภายใต้ความดันใช้งาน ปรับให้ทำงานตามที่ออกแบบ บันทึกค่าความดันที่วาล์วเปิดและ % Blow Down
ช่องจ่ายลม	1) ตรวจสอบการกัดกร่อน สึกกร่อนของแผ่นปิดทางลม (Air Damper) หรือแผ่นเปลี่ยนทิศทางลมในช่องจ่ายลม 2) ตรวจสอบความสมบูรณ์ของฉนวนรอบห้องช่องจ่ายลม 3) ตรวจสอบสภาพและการทำงานของช่องเปิด รูดตรวจสอบ ประตูทางเข้าตลอดจนแผ่นปิดรอบ Wind box ว่าไม่มีลมรั่ว
อุปกรณ์เผาไหม้สำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง (Pulverized Coal Firing)	1) อุปกรณ์ป้อนถ่าน (เข้าหม้อไอน้ำ) รายการตรวจสอบขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปต้องทำการตรวจสอบ • อุปกรณ์ขับเคลื่อนป้อนถ่าน สภาพภายนอกและสภาพการทำงานทั่วไป • การสึกกร่อนและการกัดกร่อนของแกนขับและลูกกลิ้ง (Shaft and Roll) • การสึกกร่อน และการรั่วของลมและถ่านของห้องป้อนถ่าน (Feeder Housing) • สภาพทั่วไปและความแน่นหนาของสลักยึด บูชชิง เป็นต้น 2) เครื่องบดถ่านหิน ซึ่งแบ่งได้ 4 ประเภท คือ Ball-race mills, Bowl mills, Impact หรือ Attrition mills และ Ball mills รายการตรวจสอบจะเป็นไปตามบริษัทผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปต้องทำการตรวจสอบ • สภาพภายใน ภายนอกของ Housing ของเครื่องบดเพื่อดูรอยกัดกร่อน และการรั่วไหล

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
	• สภาพและการทำงานของอุปกรณ์ปรับแต่ง (Adjusting Mechanism) ของห้องบด และหัวบด ลูกกลิ้งอยู่ในสภาพปกติ • ผิวหน้าของตัวบด (Grinding Surface) เพื่อดูการสึกกร่อน ไม่เรียบ • ตรวจวัด ปรับแต่งแรงกดของ Spring ของ Grinder • สภาพของอุปกรณ์ที่หมุน เช่น Bearing, Shaft Journals เป็นต้น • ระบบน้ำมันหล่อลื่น • สภาพและการทำงานของผิวเคลือบในห้องบดด้านหิน และอุปกรณ์กวาดวัสดุ (Scrapers)
อุปกรณ์ระบายอากาศในเครื่องบดถ่านหิน (Exhauster)	1) สภาพทั่วไปของอุปกรณ์ ตัวขับ การประกอบและการ Alignment อุปกรณ์ 2) ตรวจสอบสภาพ Bearing และตัวขับ 3) ตรวจสอบสภาพล้อ การสึกกร่อน การกัดกร่อน และการสมดุลในการหมุน 4) ตรวจสอบ Housing ของ Exhauster เพื่อดูสภาพ Liner การสึกกร่อน การกัดกร่อน หรือการ Leak
หัวเผาไหม้ถ่านหิน	1) ตรวจสอบสภาพของหัวพ่นถ่าน (Coal Nozzle) เพื่อดูการสึกกร่อน การเผาไหม้ รวมทั้งฉนวนกันความร้อนรอบๆ Burner 2) ตรวจสอบสภาพของ Coal Nozzle สภาพอิฐทนไฟ (Refractory Throat) 3) ตรวจสอบท่อส่งผงถ่านในระบบเพื่อดูการรั่วไหลผิดปกติ
อุปกรณ์เผาไหม้แบบ Stoker Coal Firing	1) <u>Underfeed Stoker</u> รายการตรวจสอบขึ้นอยู่กับผู้ผลิต Underfeed Stoker แต่โดยทั่วไปต้องตรวจสอบ • ตรวจสอบและการทำงานของชุดกระทุ้งหลักและรอง (Main Ram and Distribution Ram) รวมทั้งข้อต่อต่างๆ • ตรวจสอบการอุดตันของท่อส่งลม (Tuyeres) และปัญหาการขยับเคลื่อน • ตรวจสอบสภาพและการทำงานของช่องจ่ายลมและแผ่นปิด (Wind box and Damper) • ตรวจสอบสภาพและการทำงานของเครื่องบด (Clinker and Ash Grinding Mechanism) เครื่องกระทุ้ง (Rams) ช่องลมและแผ่นปิด (Wind box damper) 2) <u>Spreader Stoker</u> รายการตรวจสอบขึ้นอยู่กับผู้ผลิต Spreaders Stoker แต่โดยทั่วไปต้องตรวจสอบ • ช่วงห่างระหว่าง Distributor Blades และ Distributor Tray • ตรวจสอบการเสียดสีของ Feeder และ Lining
	• ตรวจสอบชุดขับ เฟืองขับ โซ่ โซ่เฟือง รวมทั้งการวางแนว (Alignment) • ตรวจสอบความเพียงพอของน้ำระบายความร้อนที่ไปยังอุปกรณ์ส่วนต่างๆ • ตรวจสอบ Over Fire Air Fan และ distribution Nozzles

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
	3) ตะกรับเตาไฟ (Damp Grates) การตรวจสอบโดยทั่วไป • สภาพ Grate Bars และการขยายตัวของส่วนต่างๆ • สภาพหลัก รอง ตะกรับเตาไฟ • สภาพ Dampers and Frames และอุปกรณ์สนับสนุน • ตรวจสอบสภาพ Fire Door Liners และ ท่อส่งลมสำหรับ Over Fire
Traveling Grates	ดำเนินการตรวจสอบอุปกรณ์ดังนี้ • ตรวจสอบการกัดกร่อน การสึกกร่อนของชิ้นส่วนของตะกรับในเตาไฟ • ตรวจสอบระบบ Air Seals • ตรวจสอบการสึกหรอที่หัวหน้าชิ้นส่วนต่างๆ • ตรวจสอบการรั่วไหลของอากาศจาก Wind box • ตรวจสอบ Air Dampers ว่าทำงานได้ถูกต้องและถูกตำแหน่ง • ตรวจสอบกลไกต่างๆ ของ Damper ดูการสึกหรอและสภาพผิดปกติ • ตรวจสอบส่วนที่สัมผัสความร้อน หรือเปลวไฟ ดูความเสียหาย บิดตัว เป็นต้น • ตรวจสอบ Shear Pin ว่าอยู่ในสภาพปกติและทำงานได้ • ตรวจสอบกลไกการทำงานของชุดขับเคลื่อนตะกรับเตาไฟ (Grate Drive) • ตรวจสอบโครงสร้างของเตาเผา ผนัง อิฐ กระเบื้องทนไฟ ถึงรอยแตก รอยแยกเป็นชิ้นๆ
ระบบเผาไหม้ด้วยน้ำมัน	ปั๊มน้ำมัน 1) ตรวจสอบมอเตอร์และชุด Turbine Drive เกียร์ปั๊มในส่วนของ • ช่องว่าง (Clearances) ในส่วนต่างๆ • สิ่งผิดปกติภายในเนื่องจาก Clearances ในส่วนต่างๆ มากเกินไป • การสึกหรอของแบร็ง • การรั่วไหล การซึมของน้ำมัน 2) ตรวจสอบมอเตอร์สภาพของปั๊มลูกสูบที่ขับเคลื่อนด้วยไอน้ำ (Steam Driven Reciprocating Pump) ในส่วนของ • การสึกหรอของลูกสูบและกระบอกสูบ ทั้งในส่วนที่สัมผัสไอน้ำและน้ำมัน • การทำงานของวาล์วไอน้ำ และส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง • บ่าวาล์วทั้งในส่วนในระบบน้ำมัน และไอน้ำ
	• การรั่วไหล ซึมของน้ำมันในส่วนต่างๆ รวมทั้งข้อต่อทุกจุด • สภาพไส้กรอง และอุปกรณ์เสริมอื่นๆ
ระบบอุ่นน้ำมัน	ปั๊มน้ำมัน

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
	1) ตรวจสอบสภาพผิวท่อของ Oil Heater ว่ามีสิ่งสกปรก คราบที่ผิวท่อหรือไม่ 2) ตรวจสอบสภาพการกัดกร่อน และการสึกกร่อนในระบบ ทั้งในด้านของน้ำมัน และไอน้ำ 3) ตรวจสอบสภาพท่อ Vent และ ท่อ Drain ว่าอุดตันหรือไม่ 4) ตรวจสอบการรั่วซึมของท่อ และแผงยึด 5) ตรวจสอบสภาพการทำงานและค่า Setting ของ Relief Valve 6) ตรวจสอบสภาพฉนวนที่ใช้ในระบบ
ระบบจ่ายเชื้อเพลิง วาล์วและท่อ	1) ตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมแรงดันออก และค่า Setting ของ Relief Valve 2) ตรวจสอบ การทำงานและค่าความดันน้ำมันขาออกที่ควบคุมอยู่ 3) ตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมความดันของไอน้ำที่จ่ายเข้า Oil Heater 4) ตรวจสอบและทำความสะอาดไส้กรองของระบบ ทั้งในระบบน้ำมันและระบบไอน้ำ 5) ตรวจสอบและตั้งค่า (Calibrate) ความดันทั้งในระบบไอน้ำมัน และไอน้ำ 6) ตรวจสอบการทำงานของ Trap Drain Valve ในระบบไอน้ำ 7) ตรวจสอบภาพ Shut off วาล์ว และ วาล์วปรับ (ความดัน ปริมาณ และอื่นๆ) รวมทั้งการตรวจสอบการรั่วซึมของระบบผ่านวาล์ว 8) ตรวจสอบและทำความสะอาดหัวจ่ายน้ำมัน อุปกรณ์ของการรั่วซึม การสึกกร่อน การเปลี่ยนสี เปลี่ยนสภาพของ Burner Nozzle 9) ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำมันตามข้อต่อและจุดอื่นๆ ในระบบ
ระบบเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ	1) ตรวจสอบสภาพการกัดกร่อน และการอุดตันของหัวฉีดก๊าซ (Gas Nozzles) 2) ตรวจสอบสภาพและการทำงานของกลไกชุดควบคุม Damper 3) ตรวจสอบสภาพการทำงานของวาล์วควบคุมแรงดันในระบบ 4) ตรวจสอบการรั่วซึมในระบบต่างๆ รวมทั้งการรั่วซึมของวาล์วต่างๆ ในระบบ
ระบบการกำจัดขี้เถ้า	1) ส่วนประกอบการทำงานของระบบที่สำคัญมี ● ระบบ Hydraulic ของระบบ ● ระบบขนย้ายขี้เถ้า 2) ในช่วงหยุดอุปกรณ์เพื่อการตรวจซ่อมหลัก อุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบจะต้องดำเนินการคือ ● การสึกกร่อน การกัดกร่อน และการรั่วซึม ● กลไกการจัดส่ง ขนย้ายขี้เถ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ● สภาพของบ่อพัก บ่อเก็บขี้เถ้ารวมทั้งอิฐ ผนังทนความร้อน ● การทำงานของระบบสุญญากาศในระบบและระบบกักเก็บ

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
	● การสีกกร่อนของท่อส่ง ในส่วนของท่อโค้ง ท่อหักโค้ง เป็นต้น ● สภาพปั๊มจี๊ด
ระบบอุ่นอากาศในหม้อไอน้ำ	1) ระบบอุ่นอากาศ ชนิด ท่อ และแผง ● ด้านก๊าซร้อน ตรวจสอบ การกัดกร่อน สีกกร่อน รวมทั้งอัตราการอุดตันที่เกิดขึ้น ● ด้านอากาศ ตรวจสอบการกัดกร่อน สีกกร่อน และการรั่วไหลออกของอากาศ ● ด้านก๊าซร้อน ทำความสะอาดสิ่งสกปรกติดค้าง อาจใช้สารเคมีทำความสะอาดตามความเหมาะสม 2) ระบบอุ่นอากาศชนิด Regenerative หรือ Ljungstrom Type ● ตรวจสอบการอุดตัน การกัดกร่อน การสีกหรือด้าน Cold End ● ตรวจสอบช่องห่างของระบบ Seal กันการรั่วไหลของอากาศสู่ก๊าซร้อน ปรับแต่งในทุกทิศทางหากจำเป็น ● ตรวจสอบสภาพชุดขับ (Gear Drive) ● หากมีการติดตั้งระบบทำความสะอาด (Soot Blower) ต้องตรวจสอบสภาพการทำงานและสภาพทั่วไป (เช่น ความดันของ ของเหลวที่ใช้ทำความสะอาด การสีกกร่อน กัดกร่อนในส่วนต่างๆ) ● ตรวจสอบระบบการระบายความร้อนของชุดแบร์ริง
พัดลม	1) พัดลมชนิด Forced Draft และ Primary Air ● ตรวจสอบครอบพัดลม (Fan Housing) และตัวพัดลม (Rotor) ดูการกัดกร่อน การสีกกร่อน และแนวโน้มการรั่วไหลของอากาศ รวมทั้งจุดยึดเชื่อมต่อ จุดต่างๆ ไม่ให้มีการหลุดหลวม ● ตรวจสอบช่องห่างระหว่างตัวพัดลมกับครอบพัดลม ● ตรวจสอบสภาพและการทำงานของกลไกการเปิดอากาศเข้าพัดลม ● ตรวจสอบการสีกหรือ ช่องห่าง การหล่อลื่น และระบบระบายความร้อนของแบร์ริง ● ตรวจสอบตำแหน่งการวางแนว (Coupling Alignment) ในช่วงใช้งาน อุปกรณ์ขณะอุณหภูมิใช้งาน 2) พัดลมชนิด Induced Draft ● ตรวจสอบครอบพัดลม (Housing) และสารเคลือบ (Housing Liners) ดู
	การสีกกร่อน การกัดกร่อน การสะสมของสิ่งตกค้างที่มากับ Fly Ash ตลอดจนการรั่วไหลของอากาศเข้าระบบ ● ตรวจสอบตัวพัดลม (Fan Rotor) และ สารเคลือบ (Liners) ดูการสีกกร่อน การกัดกร่อน การสะสมของสิ่งตกค้างที่มากับ Fly Ash และความมันคงของหมุดยึดกับรอยเชื่อม

อุปกรณ์	วิธีการดูแลรักษา
	• ตรวจสอบ ช่องว่างระหว่างตัวพัลคมกับครอบพัลคม • ตรวจสอบอุปกรณ์กันรั่วของแกนพัลคม (Shaft Seals) • ตรวจสอบสภาพและการทำงานของกลไกส่นเปิด-ปิดก๊าซที่ผ่านการเผาไหม้เข้าพัลคม • ตรวจสอบการสึกหรอ ช่องว่าง การหล่อลื่น และระบบระบายความร้อนของแบร์รี่ง์ • ตรวจสอบตำแหน่งการวางแนว (Coupling Alignment) ในช่วงใช้งานอุปกรณ์ขณะอุณหภูมิใช้งาน
อุปกรณ์ปรับลมในห้องเผาไหม้ (Damper)	1) ตรวจสอบกลไก คันบังคับ แผ่น Blade ทำงานได้ถูกต้องแม่นยำ 2) ตรวจสอบตำแหน่งของแผ่น Blade แสดงตำแหน่งได้ถูกต้องตรงกับตำแหน่งที่แสดงค่าด้านนอก 3) ตรวจสอบกลไกการแสดงตำแหน่งการใช้งานของอุปกรณ์ว่าแสดงถูกต้องและสามารถยึดหัดได้เมื่ออุณหภูมิอุปกรณ์เปลี่ยนแปลง 4) ตรวจสอบตำแหน่งหยุดของ Damper ในทิศทางปิดว่าอยู่ในตำแหน่งตามที่ต้องการ 5) ตรวจสอบแผ่นกันรั่วของลม (Seal Strips) ของ Damper ไม่บิดงอหรือเสียหาย 6) ตรวจสอบแผ่น blades มีสภาพปกติ ไม่มีร่องรอยการสึกกร่อนหรือการกัดกร่อนหรือบดงอ 7) ตรวจสอบแบร์รี่ง์จุดต่างๆ มีการหล่อลื่นเพียงพอ 8) ตรวจสอบการสึกหรอของแบร์รี่ง์และจุดหมุนต่างๆ 9) ตรวจสอบเส้นทางของก๊าซที่ผ่านการเผาไหม้แล้ว ไม่มีสิ่งสกปรกตกค้างอยู่ 10) กรณีเป็น Damper ชนิดควบคุมระยะไกล ต้องทำการตรวจสอบการสั่งการทำงานและ กลไกสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงการควบคุม 11) หากมีการออกแบบการทำงานของ Dampers ในส่วนของ Induced Draft Fan และ Forced Draft Fan ต้องมั่นใจว่าในช่วงการ Purge เตาหม้อไอน้ำ ตำแหน่งของ Damper ได้ ถูกสั่งให้เคลื่อนไป อยู่ในตำแหน่งที่ออกแบบไว้

การตรวจสอบที่เกี่ยวข้องกับงานซ่อมบำรุงเพิ่มเติมมีดังนี้

(ก) การรั่วซึมของของเหลว ของไหลในระบบ

- น้ำ ไอน้ำ ก๊าซ ของเหลวอื่นๆ
- ไอน้ำในระบบท่อไอดี (Super heater Headers and Tube Joint)
- อากาศที่อาจรั่วไหลรอบประตู (Doors) ระบบกันรั่วซึม (Seals) ร่องๆ เตาหม้อไอน้ำ

- (ข) ฉนวนกันความร้อน (Refractory)
- ตรวจสอบสภาพฉนวนกันความร้อนที่ Burner Throat
 - ตรวจสอบสิ่งสกปรก (Slag) ที่เกาะหรือเกิดอยู่บนผิวของฉนวนกันความร้อน
 - ตรวจสอบและแก้ไขหากพบฉนวนกันความร้อนหลุด หักจากตำแหน่งต่างๆ เช่น Drum, Header เป็นต้น
- (ค) หัวเผาไหม้เชื้อเพลิง (Burners)
- ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยสังเกตจากเปลวไฟที่ออกจากหัวเผาไหม้ หรือดูจากความสำเร็จของการเผาไหม้
 - ตรวจสอบปัญหาจากการทำงานของ Burner Vanes และกลไกส่วนอื่น เพื่อให้ทราบถึงความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น
- (ง) ท่อไอดัง (Super heater Tubes)
- ตรวจสอบข้อมูลความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ในท่อไอดังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพื่อให้ทราบถึงสภาพผิวในของท่อ
- (จ) Steam Drums
- ตรวจสอบข้อมูลคุณภาพน้ำ และไอน้ำ ซึ่งเป็นข้อมูลในการคาดการณ์สภาพภายในของอุปกรณ์แยกน้ำ และไอน้ำใน Drum
 - ตรวจสอบเสียงผิดปกติใน Drums หากมี อาจหมายถึงการที่จุดต่อ หรือจุดยึดอุปกรณ์ภายใน Drums หลวม หรือหลุดอยู่
- (ฉ) ระบบทำความสะอาดท่อ (Soot Blowers)
- ตรวจสอบความดันของไอน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาด
 - กรณีที่ความดันของไอน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาดที่ออกจากตัว Blower ลดลง อาจหมายถึงมีสิ่งสกปรก หรือ การอุดตันในท่อไอน้ำ
 - ทดสอบและตรวจสอบการรั่วไหลของไอน้ำที่ผ่านวาล์วต่างๆ ในระบบ
- (ช) ระบบอุ่นน้ำ และอุ่นอากาศ (Economizers and Air Pre heater)
- ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบที่ Load เดียวกัน ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่ามีปัญหาล้างสิ่งสกปรกตกค้าง หรือการรั่วไหลหรือไม่
- (ซ) การเปลี่ยนแปลงของความดันในระบบ
- ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ที่เพิ่มขึ้นจากค่าเดิมในจุดต่างๆ เพื่อให้ทราบว่ามีการอุดตัน หรือสิ่งสกปรกตกค้างในระบบเพิ่มขึ้น
 - ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ที่ลดลงจากค่าเดิมในจุดต่างๆ เพื่อให้ทราบว่าเกิดความเสียหายขึ้นในระบบนั้นๆ และใช้เป็นข้อมูลในการหาสาเหตุต่อไป
- (ณ) เตาเผาไหม้และผนัง
- ตรวจสอบการขยายตัว และหดตัวของชิ้นส่วนรับความดันระหว่างการเริ่มเดินเครื่องและหยุดเดินเครื่อง

- ตรวจสอบระบบยึดท่อ ท่อรวม (Header Support Hangers) อยู่ในช่วงการทำงานตามที่ออกแบบ หากไม่ถูกต้องอาจแสดงถึงปัญหาที่เกิดจากการยึดตัว และหลุดตัวที่เกิดขึ้น

11.4.2 หม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ทั่วไปของหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟจะเหมือนกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทั่วไปของหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะงานบำรุงรักษาที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีหัวข้อใหญ่ 3 ส่วน คือ

1. ห้องเผาไหม้ และตะกรับในเตาไฟ
2. ท่อไฟ
3. ท่อและผนังภายนอก (ส่วนที่บรรจุน้ำ)

11.4.2.1 การตรวจสอบทางบำรุงรักษา

(ก) ห้องเผาไหม้

1. ตรวจสอบสภาพการสีกกร่อน แดกร้าว หรือผิวดรูปของฉนวน และอิฐทนไฟ ในบริเวณที่มีการเผาไหม้ หรืออุณหภูมิสูง และทำการแก้ไขให้อยู่ในสภาพดี
2. ตรวจสอบการบิดงอ โกงตัวของโลหะที่อยู่ในบริเวณห้องเผาไหม้
3. ตรวจสอบการรั่วรอบๆ รอยต่อระหว่างห้องเผาไหม้และห้องบรรจุน้ำ (Tube Sheet)

(ข) ท่อไฟ

1. ตรวจสอบและทำความสะอาดท่อไฟ ทั้งนี้สิ่งตกค้างในระบบจากการทำความสะอาดท่อไฟ เป็นตัวชี้วัดหนึ่งของประสิทธิภาพด้านการเผาไหม้
2. ตรวจสอบสัญญาณการ Overheat ที่เกิดขึ้นบริเวณที่รับความร้อนสูงๆ
3. ตรวจสอบสัญญาณของรั่วซึมของท่อ
4. ตรวจสอบอุปกรณ์กระจายความร้อนในส่วนของก๊าซร้อนอยู่ในสภาพปกติ
5. ตรวจสอบและทำความสะอาดฉนวนกันความร้อนด้านก๊าซร้อน รวมทั้งตรวจหา Hot Spot ที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ
6. ตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำตามจุดเชื่อมต่อต่างๆ
7. ตรวจสอบรอยแตก (Crack) และสัญญาณของจุดที่อาจมีการรั่วซึมของน้ำ

(ค) ท่อและผนังภายนอก (ส่วนที่บรรจุน้ำ)

1. ตรวจสอบตะกรัน การกัดกร่อน การสีกกร่อนของท่อด้านน้ำ รวมทั้งความสมบูรณ์ของโครงเคร่าต่างๆ
2. ทำความสะอาดอุปกรณ์และผิวด้านสัมผัสน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างของคราบตะกรันเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุ ทำการป้องกันแก้ไขต่อไป
3. ตรวจสอบการบิด การโก่งของส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งหาจุด Hot Spot หรือ Overheat

11.4.2.2 ข้อมูลด้านการเดินเครื่องที่ใช้สำหรับงานบำรุงรักษา

- (ก) ตรวจสอบความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ที่เกิดขึ้นในระบบทางด้านก๊าซร้อนที่อยู่ในเงื่อนไขการเดินเครื่องที่ผ่านมา เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาถึงความสะดวกของส่วนที่เกิดในห้องเผาไหม้และช่องทางผ่านของก๊าซร้อน
- (ข) ตรวจสอบการแอ่นตัว และความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับท่อเหนือตะกรับเตาและส่วนอื่นๆ
- (ค) ตรวจสอบและเปรียบเทียบอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ผ่านออกจากหม้อไอน้ำที่เงื่อนไขการเดินเครื่องใกล้เคียงกัน เพื่อติดตามสภาพความสกปรกของผิวหน้าด้านก๊าซร้อน
- (ง) ตรวจสอบ (Hot Spots) สภาพเปลวไฟผ่านทางช่องตรวจสอบของหม้อไอน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลในการตรวจสอบรายละเอียดต่อไป
- (จ) ตรวจสอบร่องรอยของน้ำรั่วซึมของ Boiler Drum และส่วนอื่นๆ
- (ฉ) เมื่อมีโอกาส ให้มีการตรวจสอบระบบความปลอดภัยในส่วนของการควบคุมระบบการเผาไหม้ และระดับน้ำ

11.5 เอกสารอ้างอิง

- 11.5.1 National Board Inspection Code (NBIC) , 2001 Edition,
- 11.5.2 RECOMMENDED GUIDELINES FOR THE CARE OF POWER BOILERS ASME VII , THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS NEW YORK, NEW YORK
- 11.5.3 Combustion Fossil Power A Reference Book on Fuel Burning and Steam Generation Editor; Joseph G.Singer, P.E. Forth Edition Published by Combustion Engineering, INC. 1000 Prospect Hill Road Winsor, Connecticut 06095, 1991

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การดูแลและบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

1) การทำความสะอาดชิ้นส่วนและไส้กรอง

- รักษาความสะอาดของห้องติดตั้งหม้อไอน้ำ เตามหม้อไอน้ำ และอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง
- กำจัดคราบน้ำมัน จี๊ไฉ่ สิ่งสกปรกออกจากห้องเผาไหม้ และช่องทางออกของก๊าซร้อน
- ดำเนินการตามแผนการดูแลความสะอาดของช่องทางออกของก๊าซร้อน เตาเผาไหม้ ท่อ ปล่อง รวมทั้งอุปกรณ์ที่ติดตั้งเป็นพิเศษอื่นๆ
- ถอดประกอบฝาครอบ พัดลม และตัวพัดลมของหัวเผาไหม้ชนิด Rotary Oil อย่างน้อยปีละครั้ง เพื่อทำความสะอาด
- ตรวจสอบด้วยกระเจายนํ้ามัน (Atomizing Oil) ของหัวเผาไหม้ทุกวัน รวมทั้งการใช้วัสดุที่ใช้ทำความสะอาดเหมาะสม ไม่ไปทำความสะอาดเสียหายกับขอบถ้วย (Cup)

ข้อควรระวัง การติดตั้ง Atomizing Cup และ Air Nozzle ให้ดำเนินการตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต หากเกิดการสึกหรอของ Cup อาจต้องขันชิ้นส่วนต่างๆ ให้ถูกต้องด้วย

- ทำความสะอาดและล้างถังเก็บน้ำมันอย่างน้อยปีละครั้ง
- หมั่นตรวจสอบระบบกันรั่วซึม Stuffing ข้อต่อ หน้าแปลนต่างๆ อย่าให้มีการรั่วซึม
- ตรวจสอบไส้กรองน้ำมัน มีการทำความสะอาดตามกำหนด มีวาล์วปิดกั้นโดยรอบไส้กรองน้ำมัน เพื่อป้องกันการรั่วไหลของน้ำมัน
- การล้างไส้กรองน้ำมันควรทำการล้างด้วยน้ำมันก๊าด และหากไส้กรองน้ำมันชำรุดควรทำการเปลี่ยนทันที

2) อุปกรณ์ส่วนที่เป็นระบบไฟฟ้าและมอเตอร์

อุปกรณ์ระบบไฟฟ้า มิเตอร์ รีเลย์ และอื่นๆ ที่ทำงานร่วมกับระบบการควบคุมหัวฉีดเชื้อเพลิง จะต้องได้รับการดูแลให้เป็นไปตามตารางของบริษัทผู้ผลิต โดยทั่วไปในส่วนนี้ต้องการเพียงการทำความสะอาดไม่ให้มีฝุ่นตกค้าง

3) การดูแลชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ได้รับความชื้น หรือเปียก

- 3.1 กรณีระบบป้อนเชื้อเพลิงเปียก หรือได้รับความชื้น ชุดห้องเกียร์ของระบบป้อนเชื้อเพลิง และฝาครอบพัดลม ควรเช็ดให้แห้ง รวมทั้งการเปลี่ยนน้ำมันด้วย
- 3.2 ห้องเผาไหม้หากสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น มีโอกาสได้รับความเสียหายค่อนข้างมาก กรณีที่อิฐทนไฟในเตายังอยู่ในสภาพดี ให้ทำการระบวนการอุ่นให้แห้งอย่างช้าๆ เพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานได้ตามปกติ

4) ข้อปฏิบัติทั่วไป เมื่อมีการหยุดใช้งานหม้อไอน้ำ

- 4.1 เปิดใช้งานสวิสท์ไฟของระบบควบคุม แผงวงจร และอุปกรณ์ไล่ความชื้นตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต
- 4.2 ปิดวาล์วเชื้อเพลิงในบริเวณถังกรองน้ำมันเชื้อเพลิง รวมทั้งวาล์วที่ถังน้ำมันด้วย ในกรณีที่ระดับน้ำมันอยู่สูงกว่าหัวฉีดเชื้อเพลิงหรือปั๊ม
- 4.3 ถอดหัวฉีดเชื้อเพลิงออกทำความสะอาดทั้งด้านเชื้อเพลิงและอากาศ
- 4.4 ปิดช่องเปิดที่ต่อถึงห้องเผาไหม้ รวมทั้งช่องส่งลมสำหรับเผาไหม้ในเตาด้วย
- 4.5 คลุมอุปกรณ์ เครื่องมือด้วยวัสดุกันน้ำ
- 4.6 ตรวจสอบมอเตอร์ สายพาน และอุปกรณ์อื่นๆ แก๊วให้ใช้งานได้เป็นปกติ
- 4.7 ตรวจสอบชิ้นส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น แปร่งถ่าน สวิสท์ไฟ สะพานไฟ เป็นต้น หากพบว่ามีส่วนเสียหาย สึกหรอให้ทำการเปลี่ยน

4.8 หลังจากการทำความสะอาดหม้อไอน้ำ ให้ทำการเติมน้ำจนได้ระดับที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำเพื่อป้องกันฝุ่น
สนิม

หมายเหตุ : รายละเอียดการดูแลรักษาหม้อไอน้ำให้ตรวจสอบจากบริษัทผู้ผลิตเท่านั้น

ภาคผนวก ข ตารางตรวจสอบเพื่องานบำรุงรักษาสำหรับหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำ

รายการที่ตรวจสอบ	ผลการตรวจ		หมายเหตุ
	ปกติ	ไม่ปกติ	
1) ตรวจสอบการรั่วซึม 1.1 ระบบก๊าซจากการเผาไหม้ ไอน้ำ น้ำ 1.2 ไอน้ำ ไอคง จุดเชื่อมต่อในระบบ 1.3 ลมรั่วที่บริเวณ ประตู เตาม ท่อลม เป็นต้น			
2) อิฐทนไฟและฉนวนกันความร้อน 2.1 สภาพอิฐทนไฟของหัวจ่ายเชื้อเพลิง 2.2 สิ่งสกปรก ตกค้างที่ติดตามอิฐทนไฟ 2.3 ความสมบูรณ์ของฉนวนกันความร้อนในส่วนต่างๆ			
3) หัวจ่ายเชื้อเพลิง 3.1 การสีกกร่อนของชิ้นส่วนหัวจ่ายเชื้อเพลิง (อาจสังเกตจากรูปร่างของเปลวไฟ หรือความสมบูรณ์ของการเผาไหม้) 3.2 การทำงานของชิ้นส่วน กลไกของระบบเผาไหม้			
4) ท่อไอน้ำ ไอคง (Superheater Tubes) 4.1 สภาพภายในท่อไอน้ำที่เป็นไอคง (อาจสังเกตความผิดปกติจากค่าความดันตกคร่อมในจุดต่างๆ)			
5) ถังแยก น้ำ – ไอน้ำ (Drum) 5.1 คุณภาพของไอน้ำเป็นเครื่องชี้ความผิดปกติที่ชิ้นส่วนแยกน้ำ – ไอน้ำ (Steam Scrubbers & Separator) 5.2 เสี่ยงผิดปกติ ในถังแยกน้ำ - ไอน้ำ			
6) ระบบทำความสะอาดท่อ (Soot Blowers) 6.1 ความดันไอน้ำที่ใช้ในระบบ และค่าความดันขณะทำความสะอาดท่อ 6.2 กรณีความดันไอน้ำที่ใช้ในระบบเปลี่ยนไป อาจแสดงถึงความผิดปกติของชิ้นส่วนต่างๆ 6.3 กรณีมีความดันไอน้ำค้างในระบบหลังวาล์วปิดกั้นไอน้ำที่ปิดอยู่ แสดงถึงไอน้ำมีการรั่วผ่านวาล์วได้			
7) อุปกรณ์อุ่นน้ำและอากาศ 7.1 อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ณ จุดต่างๆ ในระบบ แสดงถึงมีการสะสมของสิ่งสกปรกตกค้างในท่อ หรือมีการรั่วไหลเกิดขึ้น			

รายการที่ตรวจสอบ	ผลการตรวจสอบ		หมายเหตุ
8) ความดันของระบบเปลี่ยนไป			
8.1 ที่ภาระเท่ากัน ถ้าความดันตกคร่อมในส่วนต่างๆ เพิ่มขึ้น อาจแสดงถึงความสกปรกภายในท่อ			
8.2 ที่ภาระเท่ากัน ถ้าความดันตกคร่อมในระบบลดลง อาจแสดงถึงปัญหาการติดตั้ง			
9) เตาเผาไหม้และเปลือกหุ้ม (Furnace & Casing)			
9.1 ในช่วงเริ่มเดินเครื่อง และเริ่มหยุดเดินเครื่อง			
9.2 ชุดแขวนรับน้ำหนัก (Support Hanger) หมั่นตรวจสอบว่ามีความตึงอย่างเสมอ			

ภาคผนวก ก ตารางตรวจสอบเพื่องานบำรุงรักษาสำหรับหม้อไอน้ำท่อไฟ

รายการที่ตรวจสอบ	ผลการตรวจสอบ		หมายเหตุ
	ปกติ	ไม่ปกติ	
1) ห้องเผาไหม้			
1.1 ตรวจสอบอิฐทนไฟ ผนวกกันไฟ ว่ามีร่องรอยความเสียหาย แตกหัก บิดงอ หรือไม่			
1.2 ส่วนที่เป็นโลหะมีการบิดงอ หรือโก่งตัวหรือไม่			
1.3 มีการรั่วไหลของก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้สู่ส่วนอื่นๆ หรือไม่			
2) ท่อไฟด้านก๊าซร้อน			
2.1 ทำความสะอาดและตรวจสอบ โดยเฉพาะในส่วนที่มีการใช้งานระบบ ทำความสะอาดท่อด้วยไอน้ำ (Soot)			
2.2 การ Overheat ในส่วนต่างๆ			
2.3 ร่องรอยของการรั่วซึมของท่อ			
2.4 การรั่วไหลของก๊าซร้อนผ่านแนวตะเข็บ ซิลกันรั่วทุกจุด			
2.5 ทำความสะอาดและตรวจสอบอิฐทนไฟด้านก๊าซร้อน ดูการอุดตันของ ทางเดินก๊าซร้อน			
2.6 จุดที่น้ำรั่วซึม			
2.7 รอยแตกร้าวของท่อ ผนัง และส่วนต่างๆ			
3) ท่อและผนัง (ด้านน้ำ)			
3.1 ตะกรัน และการกัดกร่อนที่ท่อ			
3.2 ตะกรัน และการกัดกร่อนที่แผ่นโลหะยึดท่อ (Tube Sheet)			
3.3 ตะกรัน และการกัดกร่อนที่จุดยึดเชื่อม			
3.4 ทำความสะอาดผิวด้านน้ำ เก็บตัวอย่างตะกรันที่ผิวโลหะ เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุเพื่อการแก้ไขต่อไป			
3.5 การบิดงอ โก่งตัว ที่จุดต่างๆ เนื่องจากการสัมผัสความร้อนเกินกำหนด			

ภาคผนวก ง ตารางตรวจสอบข้อมูลการเดินเครื่องเพื่องานบำรุงรักษา

รายการที่ตรวจสอบ	ผลการตรวจสอบ		หมายเหตุ
	ปกติ	ไม่ปกติ	
1) ค่าความดันตกคร่อมทางเดินของก๊าซร้อนที่สภาวะการรับภาระใกล้เคียงกัน เพื่อตรวจสอบอาการตันของระบบ			
2) อาการบีดงของท่อที่เกิดขึ้น			
3) เปรียบเทียบก๊าซร้อนก่อนออกจากหม้อไอน้ำกับอุณหภูมิของไอน้ำที่ผ่าน เพื่อเป็นข้อมูลการวิเคราะห์การเกิดตะกรัน และการอุดตัน			
4) ดูความผิดปกติของเปลวไฟในเตา รวมทั้งจุดที่ได้รับความร้อน			
5) ตรวจสอบน้ำหยด ชีม จากจุดที่มีปัญหา			
6) ทำการตรวจสอบระบบความปลอดภัย เช่น ระบบการเผาไหม้ และระบบควบคุมป้องกันของระดับน้ำ			

หน่วยที่ 12 การประเมินอายุหม้อไอน้ำและภาชนะรับแรงดัน

หม้อไอน้ำ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ ซึ่งอาจจะเป็นทั้งในรูปของไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) และ ไอน้ำยิ่งยวด (Superheat Steam) การเปลี่ยนแปลงสถานะนี้จะกระทำโดยการเติมเชื้อเพลิงเข้าในห้องเผาไหม้แล้วก๊าซร้อนจะไหลผ่านส่วนต่างๆของหม้อไอน้ำ เช่น ห้องเผาไหม้, ผนังท่อไอน้ำ (Water Wall Tube), ท่อผลิตไอน้ำยิ่งยวด (Super Heat Tube), อีโคโนไมเซอร์ และออกสู่อุปกรณ์ต่อไป โดยที่ก่อนที่จะผ่านออกสู่อุปกรณ์ต่อไปอาจจะมีระบบป้องกันมลภาวะทางอากาศเพื่อทำความสะอาดด้วยการใช้ก๊าซร้อน

การทำงานของหม้อไอน้ำภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิ จะทำให้วัสดุที่ใช้ผลิตเกิดความเค้นอย่างต่อเนื่อง และมีการกัดกร่อนของเปลือกหรือท่อไฟ ท่อไอน้ำต่างๆ ทำให้ความแข็งแรงวัสดุนั้นลดลง ซึ่งกลไกการเกิดความเสียหายสามารถนำไปสู่การประเมินอายุของหม้อไอน้ำได้จาก 3 กลไก ซึ่งมี การกัดกร่อน (Corrosion) ซึ่งสามารถกล่าวรวมถึง การกัดเซาะ (Erosion) ของของไหลที่มีความแข็งและความเร็วสูง การประเมินจากการเสื่อมสภาพวัสดุ (Material Degradation) โดยปกติจะเป็นผลของ การใช้งาน และระยะเวลาในการใช้งานซึ่งบ่งชี้ว่าการเสื่อมสภาพในหัวข้อของการคืบ (Creep) เท่านั้น และการประเมินจากความล้า (Fatigue) ซึ่งมีผลมาจากโหลดการใช้งานที่สลับไปสลับมา (Cyclic Load) อาจเป็นได้ทั้งโหลดที่เปลี่ยนแปลงของความดัน หรือโหลดที่เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

12.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินอายุการใช้งานหม้อไอน้ำหรือภาชนะรับแรงดันไอน้ำตามสภาพการใช้งานจริง

12.2 ขอบเขตและนิยาม

12.2.1 ขอบเขต

ในหน่วยนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะงาน (หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ, ท่อไอน้ำ และแบบผสม) โดยจะประเมินจากตัวอย่างวัสดุที่ใช้งานในสภาวะ ความดัน และอุณหภูมิ การคำนวณเพื่อประเมินอายุการใช้งาน และการใช้งาน เนื่องจากการคืบ ความล้า และการกัดกร่อน บนพื้นฐานของการโหลดในการปฏิบัติงานจริง

12.2.2 นิยาม

12.2.2.1 การกัดกร่อน หมายถึง ปฏิกริยาทางเคมีที่ก่อให้เกิดการสูญเสียเนื้อของวัสดุที่ถูกใช้งาน

12.2.2.2 การคืบ หมายถึง ความเสียหายที่เกิดจากปัจจัยของ “ความเค้น” “อุณหภูมิ” และ “เวลา” ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและค่าคุณสมบัติเชิงกล

12.2.2.3 ความล้า หมายถึง ความเสียหายที่เกิดจากปัจจัยของ “ความเค้นแบบสลับไปสลับมา” และ “เวลาในการรับโหลด”

หน่วยนี้สามารถนำไปพิจารณาเพิ่มเติมจากการตรวจสอบท่อ เฮดเดอร์ และผลิตภัณฑ์ท่ออื่นๆ (Tubular Products) ได้ ซึ่งจะคำนวณด้วยค่าความแข็งแรงตามเวลาที่ใช้งาน และรวมถึงชิ้นส่วนที่ใช้งานซึ่งเกิดการคืบ หรือเมื่อมีความต้องการในการตรวจสอบพิสูจน์ (Verification) ที่เกี่ยวกับโหลดแบบสลับไปสลับมา และสิ่งสำคัญจะไม่ใช้กับท่อเครื่องทวีความร้อน ที่วางอยู่บนเส้นทางของปล่องควัน (Flue Gas Path) หม้อไอน้ำที่ประเมินจะต้องได้รับ

การออกแบบตามมาตรฐานการสร้าง ส่วนการพิจารณาจะใช้ทอมของเวลาการทำงานเพื่อประเมินจากการเสื่อมสภาพของวัสดุโดยพิจารณาจากสภาพการกัดกร่อน, ความล้า และการคืบ

12.3 การตรวจสอบเบื้องต้น

12.3.1 เอกสารประกอบการตรวจสอบ

ควรประกอบไปด้วยเอกสารดังต่อไปนี้

- (ก) การออกแบบชิ้นส่วนจากโพลีเมอร์สลับไปสลับมาโดยมีการพิจารณาเกี่ยวกับการโหลดซึ่งเป็นผลของความดัน, อุณหภูมิ, การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ รวมทั้งแรงภายนอกและโมเมนต์
- (ข) ความเป็นไปได้ในการเข้าถึงและจุดตรวจสอบ
- (ค) การออกแบบชิ้นส่วนปฏิบัติงานเพื่อนำไปสู่การทดสอบเพิ่มเติม
- (ง) การตรวจสอบประวัติ เวลา, ความดันและอุณหภูมิใช้งาน

จุดวัดความดันและอุณหภูมิจะต้องถูกทำ “แผนภาพการตรวจวัด” (Measuring Point Diagram) ส่วนความดันจะถูกกำหนดโดยมีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิ จุดวัดอุณหภูมิของไอน้ำจะถูกกำหนดที่ ตอนสุดท้ายของเครื่องทรีความร้อน และหลังจากการลดความร้อนขจัดยิ่ง

เครื่องมือวัดอุณหภูมิอาจเป็นแบบชั่วคราวหรือแบบถาวร ซึ่งอาจมีความจำเป็นอย่างเช่น ในตอนช่วงต้นของเครื่องทรีความร้อนและควรมีการสร้างค่าการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยในกรณีที่มีการเรียงแบบขนาน โดยที่เครื่องมือวัดอุณหภูมิการปฏิบัติงานและความดันต้องสามารถถูกตรวจสอบพิสูจน์ได้

วิธีการต่อไปนี้อาจจะถูกนำมาใช้

- (ก) การจดบันทึกการวัด (แบบอนาล็อกหรือดิจิตอล) สำหรับการประเมินค่าการโหลดเนื่องจากความดันและอุณหภูมิ
- (ข) การจดบันทึกการวัด (แบบอนาล็อกหรือดิจิตอล) ของความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังภายในและภายนอก ของชิ้นส่วนซึ่งอาจเป็นตัวกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการใช้งาน
- (ค) การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive) ในการผลิตและการตรวจสอบเป็นช่วงเวลา ในการตรวจสอบควรทำการตรวจสอบในตำแหน่งเดิม
- (ง) การวัดรูปร่าง (Geometry) อย่างเช่น การวัดความหนาของผนังและความไม่กลม (Out-of-roundness) ของท่อ
- (จ) การสร้างชุดการวัดแบบเพื่อถาวรเพื่อบันทึกค่าอย่างสม่ำเสมอ
- (ฉ) การตรวจสอบสภาพผิว
- (ช) การดำเนินการประเมินการเสื่อมสภาพ (Exhaustion) เนื่องด้วยความล้า และการคืบ

12.4 การตรวจสอบการสร้างจริง

ผู้ผลิตหรือผู้ใช้จะกระทำการวัดและทำการตรวจสอบการสร้างจริง ผู้ตรวจสอบอาจจะกำหนดการตรวจเป็นแบบสุ่มตรวจ โดยจุดวัดที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับความดัน และอุณหภูมิ

12.5 การทดสอบในการเริ่มงาน

การตรวจสอบพิสูจน์ข้อมูลการปฏิบัติงาน ผู้ตรวจสอบจะประเมินการใช้งานหม้อไอน้ำ จะดำเนินการพิจารณาจากอายุการใช้งานของชิ้นส่วน โดยอาศัยผลการทดสอบและการวัด จากผลการใช้งานช่วงปีแรก โดยเครื่องมือที่ใช้ควรมีการตรวจสอบ ค่าความถูกต้อง

12.6 วิธีการประเมินอายุการใช้งานหม้อไอน้ำ

การประเมินอายุหม้อไอน้ำสามารถประเมินจากสภาพความเสียหายที่เกิดจากการใช้งานจริง ดังนี้

- การประเมินจากการกัดกร่อน
- การประเมินจากการคืบ
- การประเมินจากความล้า

12.6.1 การประเมินออกแบบ

การประเมินการออกแบบหรือการประเมินความหนาที่ชิ้นส่วนสามารถรับโหลดได้ตาม อุณหภูมิหรือความดันที่ใช้งาน โดยการออกแบบเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบที่ผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนด

12.6.2 การประเมินอายุการใช้งานจากการกัดกร่อน

การประเมินอายุการใช้งานต่อการกัดกร่อน กระทำได้โดยหาค่าผลต่างระหว่างความหนาของชิ้นงานที่วัดได้และความหนาที่น้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ต่ออัตราการกัดกร่อนของวัสดุ

ตัวอย่าง หม้อน้ำผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนเครื่องหนึ่งใช้งานมาแล้ว 12 ปี โดยเปลือกมีความหนาเท่ากับ 21 mm. และมีค่าความหนาต่ำสุดซึ่งสามารถทนแรงดันได้ เท่ากับ 17 mm.(จากการคำนวณ) โดยที่เหล็กชนิดนี้มีอัตราการกัดกร่อน เท่ากับ 0.2 mm. ต่อปี ดังนั้นหม้อไอน้ำนี้สามารถใช้งานต่อไปได้เท่ากับ $(21 - 17) / 0.2$ ซึ่งเท่ากับ 20 ปี

12.6.3 การประเมินอายุการใช้งานต่อการคืบ

การประเมินอายุจากการคืบ นั้นสามารถประเมินได้ 2 วิธีดังนี้

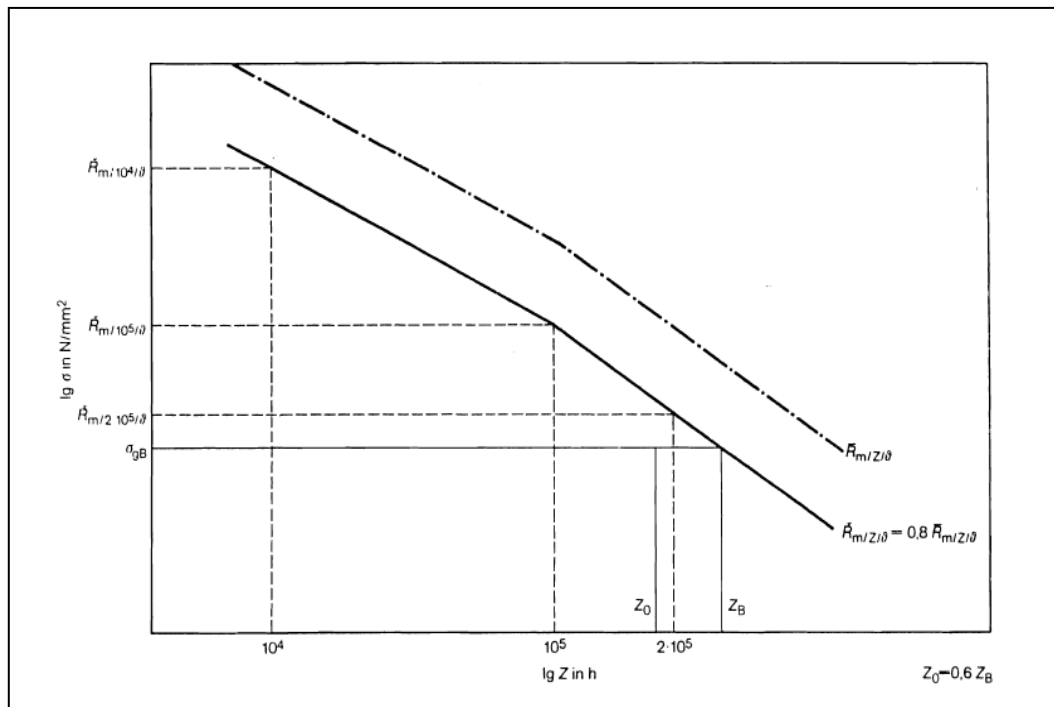
- การประเมินจากตาราง Lifetime ของวัสดุแต่ละชนิด
- การประเมินจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางจุลโครงสร้างของวัสดุ

12.6.3.1 การประเมินอายุการใช้งานจากการคืบโดยประเมินจากตาราง Lifetime ของวัสดุแต่ละชนิด

การประเมินในหน่วยนี้ใช้ ข้อมูลกราฟ “Component Lifetime” ของแต่ละวัสดุ โดยประเมินร่วมกับความดันและอุณหภูมิที่วัดในการทำงาน และความหนาของผนังที่บางที่สุดที่ถูกวัด (ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าจุดที่บางที่สุดนั้นเป็นชิ้นส่วนที่อ่อนแอที่สุด) การประเมินผลจะกระทำตามรูปที่ 2.1 เพื่อประเมิน เวลา Z_0 และ Z_B จะถูกทำการประเมินด้วย

จากรูปที่ 12.1 จะได้ Z_B ซึ่งเป็นจุดตัดของ เส้นความเค้นใช้งาน (Working stress, σ_{WB}) และกราฟพิกัดล่าง (Lower limit curve)ซึ่งได้จากค่า 0.8 เท่าของช่วงการกระจาย (Scatter band)

สำหรับค่าความแข็งแรงทนต่อการแตกร้าวจากการคืบ (Creep rupture strength) ที่อุณหภูมิ
ปฏิบัติงาน(0,8 $\bar{R}_{m/Z/0}$) ซึ่งจุดตัดบนแกน “X” จะบอกถึงเวลาที่คาดว่าจะเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.1 แผนภาพของการกำหนดค่า Z_0 และ Z_B

จากนั้น จึงการประเมินการใช้งานเนื่องจากการคืบ โดยการพิจารณาค่าไหลจากการใช้งาน(คำนวณตามมาตรฐานที่ใช้ออกแบบเพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน) โดยพิจารณาจากผลการปฏิบัติงานย้อนหลัง บนชิ้นส่วนที่อ่อนแอที่สุด โดยคำนึงถึงปัจจัยของอุณหภูมิและความดันในการปฏิบัติงาน

อัตราใช้งาน $e_{z,k}$ จะขึ้นกับเวลาปฏิบัติงาน $Z_{B/p}$ ต่อช่วงเวลาของอายุชิ้นส่วนออกแบบ (Component design lifetime) $Z_{B/p}$ ซึ่งผู้ใช้ต้องรวบรวมข้อสรุปของเวลาปฏิบัติงานกับอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องและอัตราความดันและบันทึกเอาไว้

(การประเมินผลข้อมูลโดยระบบประมวลผลข้อมูล(Data processing system) ต้องได้รับการตรวจสอบโดยผู้ตรวจสอบที่ได้รับมอบหมาย และสามารถตรวจพิสูจน์ผลของการประเมินได้) ตามการประเมินออกแบบความเค้นสูงสุด สำหรับแต่ละชิ้นส่วนที่รับความดันจะต้องถูกคำนวณโดยใช้ความดันใช้งานสูงสุด (Full load working pressure) และในช่วงอุณหภูมิการทำงาน ให้ประเมินจากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังและความเค้นที่ได้จากเวลา $Z_{B/p}$ โดยอัตราการใช้งานกับสภาวะการคืบจะเท่ากับ

$$e_{z,k} = \frac{Z_{M/p}}{Z_{B/p}} \cdot 100 \quad (12-2)$$

อัตราใช้งานเนื่องจากการคืบนี้ อาศัยสมมติฐานตาม “กฎความเสียหายเชิงเส้น(Linear damage rule)” โดยการรวมค่า “ $C_{z,k}$ ” ของค่าอัตราอุณหภูมิและอัตราความดันทุกค่าที่มีการบันทึกผลตามสมการที่12-3

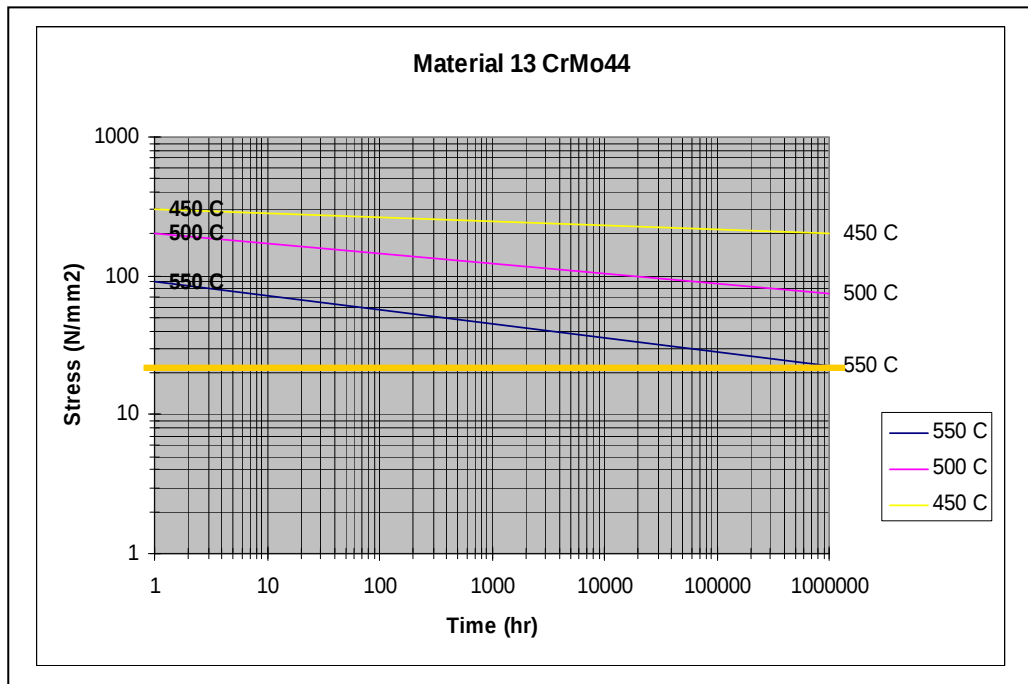
$$e_z = \sum_k e_{z,k} \quad (12-3)$$

ตัวอย่าง การประเมินอายุหม้อไอน้ำ จากการคืบผลการใช้งาน หม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า แห่งหนึ่ง มีข้อมูลการทำงานดังตารางที่ 12.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 12.1 ข้อมูลการใช้งานหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่ง

Class assign	Temperature ranking				
Operation Pressure	20 < T < 400	400 < T < 500	500 < T < 510	510 < T < 550	Remark
100 % (35 bar)	2500 hr	6500 hr	2800 hr	123000 hr	
80% (28 bar)	3000 hr	600 hr	1000 hr	20000 hr	
...	...	...	...	...	
0 %	...	...	...	...	

ความดัน 100% เท่ากับ 35 bar ที่อุณหภูมิเท่ากับ 540 °C, เวลาในการปฏิบัติงาน (operation time) = 123,000 hr.จากการพิจารณาแบบหม้อไอน้ำ จากนั้นนำค่าความดัน 35 บาร์ที่ใช้งานมาคำนวณหาความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ถูกประเมิน โดยปกติแล้วหม้อไอน้ำในแต่ละส่วนมาประเมินพบว่าชิ้นส่วนที่อ่อนแอที่สุด จากตัวอย่างนี้สมมติให้ผลการคำนวณความเค้นได้เท่ากับ 21.9 N/mm² ดังนั้นจึงสามารถประเมินอายุของชิ้นส่วนนั้นได้โดยอาศัยกราฟสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้าง ดังรูปที่12.2 ดังนี้



รูปที่ 12.2 Life Time Curve ของ วัสดุ 13 CrMo44

หมายเหตุ : กำหนดให้วัสดุที่ใช้ทำท่อของท่อไอน้ำในโรงไฟฟ้า ตามตัวอย่าง นี้จะเกิดการคืบที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C

ตัดกราฟที่ค่า $\sigma = 21.9 \text{ N/mm}^2$ ที่อุณหภูมิ 550 °C มีค่าการอนุญาตเนื่องจากการคืบ (allowance operation time) เท่ากับ 1,000,000 hr ดังนั้นเมื่อนำค่ามาประเมินเป็น เปอร์เซนต์อายุของหม้อน้ำจากการคืบตามสมการ 12-2 $e_z = \text{operation time} / \text{allowance hour}$ ซึ่งได้เท่ากับ $123000 \times 100 / 1000000$ (12.3 % สำหรับการประเมินอายุจากการคืบที่อุณหภูมิ 510 - 550 °C) จากนั้น ทำการประเมินค่าที่ได้จากการใช้งานทั้งหมดแล้วรวมเป็นค่าการประเมินอายุจากการคืบทั้งหมดให้เป็นเปอร์เซนต์แล้วจะมีค่าโดยสรุป ดังตารางที่ 12.2

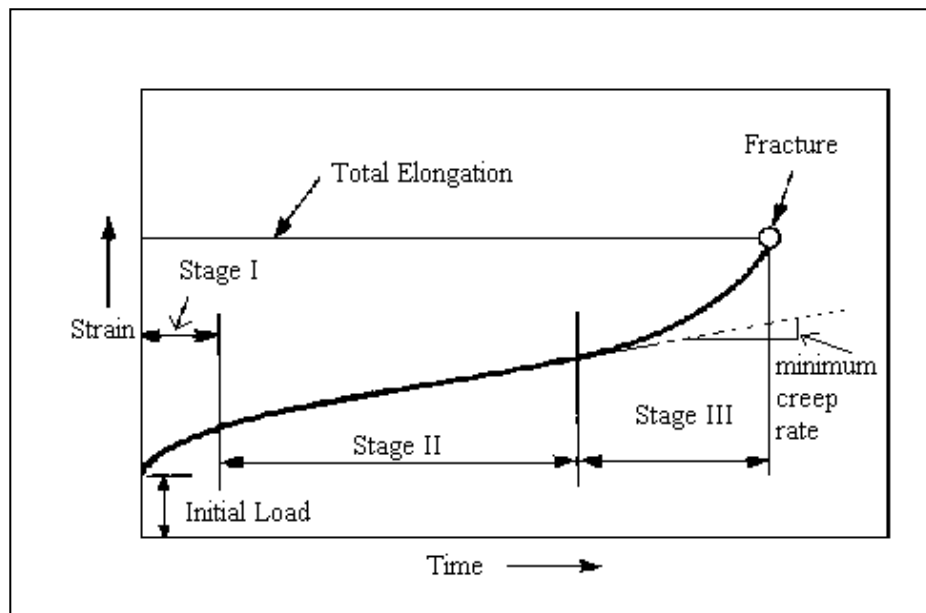
ตารางที่ 12.2 แสดงผลการคำนวณวัสดุ 13 CrMo44

Class assign	Temperature ranking				
Operation Pressure	20 < T < 400	400 < T < 500	500 < T < 510	510 < T < 550	Σ Time
100 % 35 bar	0	0	2.3 %	12.3 %	14.6 %
80% 28 bar	0	0	1.2 %	2.3 %	3.5 %
...	...	...	...	...	...
0 %	...	...	...	...	...
Total e_z					= 18.1 %

ดังนั้นผลรวมการประเมินอายุเนื่องจากการคืบมีค่าเท่ากับ 18.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่า หม้อไอน้ำชุดที่ถูกประเมินนี้ใช้งานมาได้ 18.1 เปอร์เซ็นต์จากอายุ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือ หากหม้อไอน้ำมีการออกแบบหม้อไอน้ำมีการออกแบบอายุไว้ที่ 200,000 ชั่วโมง (ค่า 200,000 ชั่วโมงนี้เป็นค่าปกติที่ได้จากการทดสอบค่าความคืบ) ดังนั้นหม้อไอน้ำชุดนี้จะมีอายุการใช้งานเหลืออยู่เท่ากับ 163,800 ชั่วโมง

12.6.3.2 การประเมินจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางจุลโครงสร้างของวัสดุ

การประเมินชนิดนี้กระทำได้โดยการตรวจวัดโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ มาเปรียบเทียบกับภาพวัสดุมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง แล้วแบ่งลำดับขั้นของความเสียหายออกเป็นขั้นๆ (Stage) โดยพิจารณาพฤติกรรมของการคืบ สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 12.3



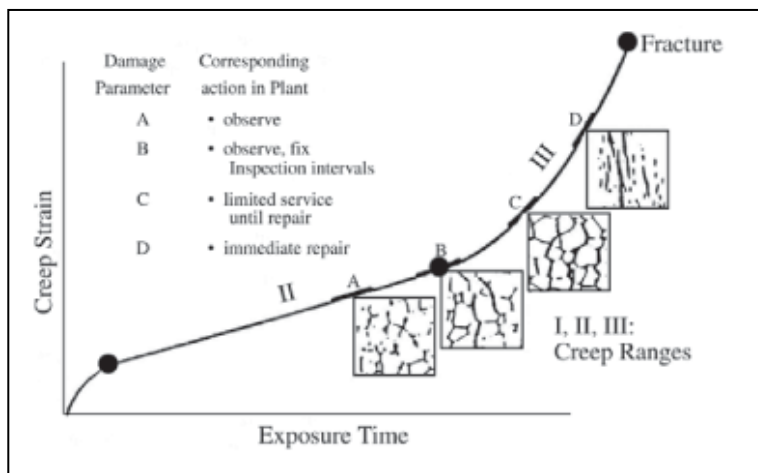
รูปที่ 12.3 Strain & Time Curve จากการทดสอบ Creep Test (Creep Curve)

จากรูปแสดงสามารถอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ใน Creep Curve ได้ ดังนี้

- ลักษณะทั่วไปของกราฟการคืบจะสัมพันธ์กับเวลา ความลาดชันของ Curve คือ Curve Rate ($d\epsilon/dt$)
- ในสถานะเริ่มต้น (Initial State) การเพิ่มขึ้นของการยืดของความเครียด (Plastic Strain) เกิดขึ้นจากภาระ ที่ใส่เข้าไป โดยสังเกตจาก Curve ที่มีค่าความชันสูงมาก และใช้เวลาค่อนข้างน้อย
- สถานะแรกเริ่ม สถานะที่การต้านทานการคืบ (Creep Resistance) เพิ่มขึ้นโดยหากการลาดชันของ Curve ลดลง Creep Strain Rate จะลดลงตาม
- Secondary State (Steady State) : ในช่วงนี้จะเกิดการแรงกระทำก่อให้เกิดความแข็งแรงกับวัสดุ (Work Hardening) หรือเทียบเท่ากับค่าความแข็งแรง (Strength) ในเนื้อวัสดุกับกระบวนการฟื้นกลับ (Recovery Processes) เมื่อเปรียบเหมือนแรงกระทำจากภายนอกกับวัสดุทำให้เกิดการคงที่ของ Creep Rate ที่มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสถานะนี้จะใช้ระยะเวลาค่อนข้างยาวนาน
- สถานะสุดท้าย ในช่วงนี้ Creep Rate จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีการรวมตัวของช่องว่าง (Cavities) ต่างๆ ทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ

ตารางที่ 12.3 การจัดระดับของความเสียหายของการคืบ อาจจะแบ่งออกเป็นระดับชั้นต่างๆ ดังนี้ตามมาตรฐาน

กรณีแบ่งตาม VGB Standard	กรณีแบ่งตาม ASTM Standard
Assessment Class Structure and Damage Condition	Damage Parameter : Structure and Damage Condition : Action Required
0 as received without thermal service	
1 creep expose, without cavities	
2a advance creep exposure, isolated cavities	A Isolated cavities : None until major maintenance
2b advance creep exposure, numerous cavities without preferred orientation	
3a creep damage, numerous orientated cavities	B Oriented cavities : Replica test at specified interval
3b advance creep damage, chains of cavities and/or grain boundary separation	
4 advance creep damage, micro crack	C Micro-crack : Limit service until repair
5 Large creep damage, macro crack	D Macro-crack : Immediate repair



รูปที่ 12.4 การประมาณความเสียหายเนื่องจากการคืบด้วยวิธีวิเคราะห์จูลโครงสร้าง ซึ่งอธิบายตามตารางที่ 12.3

12.7 เอกสารอ้างอิง

- 12.7.1 TRD, **Technical rules** for steam boilers
- 12.7.2 API STANDARD, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction
- 12.7.3 VGB standard for the technique and operation of power plants
- 12.7.4 ASTM E139 - 06 Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ตารางแปลงหน่วย

พื้นที่	ft ²	in ²	m ²	cm ²	mm ²
1	1	144	0.09291	929.034	9.29×10 ³
6.944×10 ⁻³		1	6.451×10 ⁻⁴	6.4516	645.1625
10.7639		1550	1	1×10 ⁴	1×10 ⁶
1.0764×10 ⁻³		0.155	1×10 ⁻⁴	1	100
1.076×10 ⁻⁵		1.55×10 ⁻²	1.55	.01	1

น้ำหนัก	pound	ounce	kilogram	gram	grain
1	1	16	0.45359	453.592	7000
0.0625		1	0.02834	28.349	437.5
2.205		32.15	1	1000	15.432×10 ³
2.2205×10 ⁻³		0.03527	0.001	1	15.432
0.01736		0.02083	64.8×10 ⁻⁶	0.0648	1

กำลัง	kilowatt	horsepower*	ft lbs/sec	ft lbs/min	ft lbs/hr	Btu/sec	Btu/min	Btu/hr
1	1	1.3415	738	44.268×10 ³	2.656×10 ⁶	0.948	56.9	3413
0.7455		1	550	33×10 ³	1.98×10 ⁶	0.707	42.44	2544
13.55×10 ⁻⁴		18.18×10 ⁻⁴	1	60	3600	12.84×10 ⁻⁴	0.0771	4.62
22.59×10 ⁻⁶		0.303×10 ⁻⁶	0.01667	1	60	21.41×10 ⁻⁶	12.84×10 ⁻⁴	0.0771
* U.S. (U.S. horsepower × 1.014 = metric horsepower)	0.376×10 ⁻⁶	0.505×10 ⁻⁶	2.78×10 ⁻⁴	0.01667	1	0.357×10 ⁻⁶	21.41×10 ⁻⁶	12.84×10 ⁻⁴
metric horsepower × 0.9863 = U.S. horsepower)	1.055	1.416	778	46.7×10 ³	2.802×10 ⁶	1	60	3600
	0.01759	0.02359	12.98	778	46.7×10 ³	0.01667	1	60
	2.931×10 ⁻⁴	3.932×10 ⁻⁴	0.2163	12.98	778	2.778×10 ⁻⁴	0.01667	1

พลังงาน	kilowatt- hours	horsepower- hours	foot pounds	Btu	kilogram- meters	kilogram- calories	loules
1	1	1.342	2.655×10 ⁶	3415	367.1×10 ³	860.238	3.6×10 ⁶
0.7457		1	1.98×10 ⁶	2546.5	273.746×10 ³	641.477	2.685×10 ⁶
0.376×10 ⁻⁶		0.505×10 ⁻⁶	1	1.286×10 ⁻³	0.13826	3088	1.3562
2.928×10 ⁻⁴		3.929×10 ⁻⁴	778	1	107.5	0.2519	1054.8
2.723×10 ⁻⁶		3.653×10 ⁻⁶	7.233	9.302×10 ⁻³	1	23.43×10 ⁻⁴	9.804
1.623×10 ⁻³		1.558×10 ⁻³	3087.35	3.9683	426.843	1	4185.829
3.6×10 ⁶		2.684×10 ⁶	0.7373	1054.8	0.10194	4186	1

ความเร็ว	cm/sec	meter/sec	meter/min	kilometer/hr	feet/sec	feet/min	mile/hour
1	1	0.01	0.6	0.036	0.03281	1.9685	0.02237
100		1	60	3.6	3.281	196.85	2.2369
1.667		0.01667	1	0.06	0.05468	3.281	0.03728
statute mile/hour × 0.8684 = knot	27.78	0.2778	16.67	1	0.91134	54.681	0.62137
knot × 1.1516 = statute mile/hour	30.48	0.3048	18.29	1.0973	1	60	0.68182
feet/sec × 0.5921 = knot	0.508	5.08×10 ⁻³	0.3048	0.01829	0.01667	1	0.01136
knot × 1.689 = feet/sec	44.704	0.44704	26.82	1.6093	1.4667	88	1

ความยาว	foot	inch	meter	centimeter	milimeter	micron	angstrom
1	1	12	0.3048	30.48	304.8006	3.048×10 ⁵	3.048×10 ⁹
0.08333		1	0.0254	2.54	25.4	2.54×10 ⁴	2.54×10 ⁸
3.28083		39.37	1	100	1000	1×10 ⁶	1×10 ¹⁰
1 statute mile 5280 feet	0.03281	0.3937	0.01	1	10	1×10 ⁴	1×10 ⁸
1609 meters = 0.8684 nautical mile	3.281×10 ⁻³	0.03937	0.001	0.1	1	1000	1×10 ⁷
1 nautical mile = 6081 feet	3.281×10 ⁻⁶	3.937×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻³	1	1×10 ⁴
1852 meters = 1.1516 statute mile	3.281×10 ⁻¹⁰	3.937×10 ⁻⁹	1×10 ⁻¹⁰	1×10 ⁻⁸	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁴	1

ภาคผนวก ก ตารางแปลงหน่วย (ต่อ)

ความดัน	atm	bar	kgf/cm ²	psi	inches Hg	microns Hg	torr (mm Hg)	
	1	1.01325	1.0332	14.696	29.921	760×10 ³	760	
	0.98692	1	1.01971	14.504	29.53	750.059×10 ³	750.059	
	1 atm = 33.93 Feet of Water	0.96784	0.98067	1	14.223	28.959	735.56×10 ³	735.56
		0.06805	0.06895	0.07031	1	2.036	51.715×10 ³	51.715
PSIG lb/in ² Gage	0.03342	0.03364	0.03453	0.49116	1	2.54×03	2.54	
PSIA lb/in ² absolute	1.3158×10 ⁻⁶	1.3332×10 ⁻⁶	1.3595×10 ⁻⁶	19.337×10 ⁻⁶	39.37×10 ⁻⁶	1	1×10 ⁻³	
PSIA PSIG plus atmospheric pressure.	1.3158×10 ⁻³	1.3332×10 ⁻³	1.3595×10 ⁻³	19.337×10 ⁻³	39.37×10 ⁻³	1×10 ³	1	

ปริมาตร	meter ³	foot ³	gallon*	liter	quart	inch ³	cc	
	1	35.31	264.2	1000	1056.8	61.023	1×10 ⁶	
	*U.S. gallon	28.317×10 ⁻³	1	7.4805	28.317	29.92	1728	28.317×10 ³
	(U.S. gallon × 0.83267 = British Imperial gallon	3.785×10 ⁻³	0.1337	1	3.785	4	231	3785
	Imperial gallon	1×10 ⁻³	0.03531	0.2642	1	1.057	61.023	1000
	British Imperial gallon	9.463×10 ⁻⁴	0.03342	0.25	0.9463	1	57.75	946.25
	1.20095 = U.S. gallon	0.05787	5.787×10 ⁻⁴	43.29×10 ⁻⁴	0.01639	0.01732	1	16.387
	U.S. gallon water = 8.3453 pounds	1×10 ⁻⁶	35.31×10 ⁻⁶	2.642×10 ⁻⁴	1×10 ⁻³	10.568×10 ⁻⁴	0.06102	1
	British imperial gallon water 10.0 pounds							
	U.S. fluid ounce = 29.5737 centimeters ³							
	British Imperial fluid ounce 28.413 centimeters ³)							

ความหนาแน่น	pound/inch ³	pound/ft ³	pound/gallon	kg/meter ³	gram/cm ³
	1	1728	231	27.68×10 ³	27.6797
	5.787×10 ⁻⁴	1	0.1337	16.018	0.01602
	4.33×10 ⁻³	7.48	1	119.8257	0.11983
	3.613×10 ⁻⁵	0.06243	8.3438×10 ⁻⁴	1	1000
0.03613	62.43	0.83438	0.001	1	

การไหล	gal/hr	gal/min	cu ft/hr	cu ft/min	liters/hr	liters/min	cc/min
	1	0.01667	0.1337	2.228×10 ⁻³	3.7848	0.06308	63.08
	60	1	8.022	0.1337	227.1	3.7848	3784.8
	7.48	0.1247	1	0.01667	28.32	0.472	472
	448.8	7.48	60	1	0.47195	28.32	28.32×10 ³
	0.26418	4.403×10 ⁻³	0.03531	5.886×10 ⁻⁴	1	0.01667	16.67
	15.8502	264.18×10 ⁻³	2.11887	0.03531	60	1	1000
	4.403×10 ⁻⁶	264.2×10 ⁻⁶	0.5886×10 ⁻⁶	35.3145×10 ⁻⁶	16.67×10 ⁻⁶	0.001	1

แปลงค่าอุณหภูมิ	Temperature Scale					
		Water Boiling Point	Water Freezing Point	Absolute Zero		
	Locate known temperature in center column. If known temperature is in °C, read °F equivalent in right-hand column. If known temperature is in °F, read °C equivalent in left-hand column. For temperatures not given in table, or to convert to other temperature scales, use the following:	°F (Fahrenheit)	212°F	32°F	-459	°C = (°F-32) $\frac{5}{9}$
		°C (Celsius or Centigrade)	100°C	0°C	-273	°F = $\frac{9}{5}$ °C+32
		°K (Kelvin-absolute)	373°K	273°K	0	°R = 8°C
		°R (Reaumur)	80°R	0°R	-218	°K = °C+273
		°Rank	671°	491°	0	°Rank = °F+459.67
		(Rankine)	Rank	Rank		

ภาคผนวก ข ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์

ตาราง ข.1 ตารางไอน้ำอิ่มตัว

H ₂ O	Saturated water—Temperature table												
	Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
			Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
	0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
	5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
	10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
	15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
	20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
	25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
	30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
	35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
	40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
	45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
	50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
	55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
	60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
	65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
	70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
	75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
	80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
	85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
	90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
	95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	Sat. press., MPa												
	100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
	105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
	110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
	115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
	120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
	125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
	130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
	135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
	140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
	145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
	150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
	155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
	160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
	165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
	170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
	175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
	180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
	185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
	190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
	195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

ตาราง ข.1 ตารางไอน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} MPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001263	0.04598	1104.28	1596.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001425	0.019948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001447	0.018350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001472	0.016867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001499	0.015488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001561	0.012996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001638	0.010797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001740	0.008813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001893	0.006945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002213	0.004925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Source: Tables A-4 through A-8 are adapted from Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI Version, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1986), pp. 635-651. Originally published in Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill, and Joan G. Moore, *Steam Tables*, SI Units (New York: John Wiley & Sons, 1978).

H₂O

ตาราง ข.1 ตารางไอน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

H ₂ O	Saturated water—Pressure table											
	Press., P kPa	Sat. temp., T _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K	
			Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Sat. vapor, s _g
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2871.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

ตาราง ข.1 ตารางไอน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

Saturated water—Pressure table (Concluded)

Press., MPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
1.40	195.07	0.001149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1957.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

H₂O

ตาราง ข.2 ตารางไอร้อนยิ่งยวด

Superheated water																	
H ₂ O	<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
	<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*					<i>P</i> = 0.05 MPa (81.33°C)					<i>P</i> = 0.10 MPa (99.63°C)						
Sat. [†]	14.674	2437.9	2584.7	8.1502		3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594				
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749													
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479		3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614				
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882		3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134				
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038		4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343				
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002		4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333				
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813		5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158				
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077		6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435				
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978		7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342				
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608		8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976				
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028		8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398				
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281		9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652				
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396		10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767				
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393		11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764				
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287		12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659				
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091		13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463				
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811		14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183				
	<i>P</i> = 0.20 MPa (120.23°C)					<i>P</i> = 0.30 MPa (133.55°C)					<i>P</i> = 0.40 MPa (143.63°C)						
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272		0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959				
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795		0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299				
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066		0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706				
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086		0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789				
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926		0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662				
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218		1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985				
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133		1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913				
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770		1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558				
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194		1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987				
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449		1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244				
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566		1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362				
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563		1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360				
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458		2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256				
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262		2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060				
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982		2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780				
	<i>P</i> = 0.50 MPa (151.86°C)					<i>P</i> = 0.60 MPa (158.85°C)					<i>P</i> = 0.80 MPa (170.43°C)						
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213		0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628				
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592		0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158				
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709		0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384				
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599		0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328				
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329		0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089				
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938		0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716				
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873		0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673				
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522		0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333				
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952		0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770				
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211		0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033				
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329		0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153				
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328		0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153				
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224		1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050				
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029		1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855				
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749		1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575				

*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

[†]Properties of saturated vapor at the specified pressure.

ตาราง ข.2 ตารางไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

Superheated water (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K		
$P = 1.00 \text{ MPa (179.91}^{\circ}\text{C)}$					$P = 1.20 \text{ MPa (187.99}^{\circ}\text{C)}$					$P = 1.40 \text{ MPa (195.07}^{\circ}\text{C)}$				
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693		
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975		
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467		
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534		
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360		
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026		
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027		
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710		
700	0.4478	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160		
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431		
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556		
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559		
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457		
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262		
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2984		
$P = 1.60 \text{ MPa (201.41}^{\circ}\text{C)}$					$P = 1.80 \text{ MPa (207.15}^{\circ}\text{C)}$					$P = 2.00 \text{ MPa (212.42}^{\circ}\text{C)}$				
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409		
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4808	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147		
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453		
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7664		
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563		
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271		
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317		
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024		
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487		
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2808	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765		
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895		
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901		
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8837	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7800		
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607		
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329		
$P = 2.50 \text{ MPa (223.99}^{\circ}\text{C)}$					$P = 3.00 \text{ MPa (233.90}^{\circ}\text{C)}$					$P = 3.50 \text{ MPa (242.60}^{\circ}\text{C)}$				
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253		
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639										
250	0.08700	2662.6	2880.1	6.4085	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749		
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461		
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579		
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405		
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09196	3015.3	3337.2	7.0052		
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108.0	3456.5	7.2338	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572		
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.13243	3285.0	3682.3	7.5085	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339		
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.8	7.6837		
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134		
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276		
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288		
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6762	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192		
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000		
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723		

H₂O

ตาราง ข.2 ตารางไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

H ₂ O	Superheated water (Continued)																		
	T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K		
P = 4.0 MPa (250.40°C)					P = 4.5 MPa (257.49°C)					P = 5.0 MPa (263.99°C)									
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.04406	2600.1	2798.3	6.0198	0.03944	2597.1	2794.3	5.9734	0.04141	2631.3	2838.3	6.0544	0.04532		
275	0.05457	2667.9	2886.2	6.2285	0.04730	2650.3	2863.2	6.1401	0.04141	2631.3	2838.3	6.0544	0.04532	2698.0	2924.5	6.2084	0.05194		
300	0.05884	2725.3	2960.7	6.3615	0.05135	2712.0	2943.1	6.2828	0.04532	2698.0	2924.5	6.2084	0.05194	2808.7	3068.4	6.4493	0.05781		
350	0.06645	2826.7	3092.5	6.5821	0.05840	2817.8	3080.6	6.5131	0.05194	2808.7	3068.4	6.4493	0.05781	2906.6	3195.7	6.6459	0.06330		
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.06475	2913.3	3204.7	6.7047	0.05781	2906.6	3195.7	6.6459	0.06330	2999.7	3316.2	6.8186	0.06857		
450	0.08002	3010.2	3330.3	6.9363	0.07074	3005.0	3323.3	6.8746	0.06330	2999.7	3316.2	6.8186	0.06857	3091.0	3433.8	6.9759	0.07869		
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.07651	3095.3	3439.6	7.0301	0.06857	3091.0	3433.8	6.9759	0.07869	3273.0	3666.5	7.2589	0.08849		
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.08765	3276.0	3670.5	7.3110	0.07869	3273.0	3666.5	7.2589	0.08849	3457.6	3900.1	7.5122	0.09811		
700	0.11095	3462.1	3905.9	7.6198	0.09847	3459.9	3903.0	7.5631	0.08849	3457.6	3900.1	7.5122	0.09811	3646.6	4137.1	7.7440	0.10762		
800	0.12287	3650.0	4141.5	7.8502	0.10911	3648.3	4139.3	7.7942	0.09811	3646.6	4137.1	7.7440	0.10762	3840.7	4378.8	7.9593	0.11707		
900	0.13469	3843.6	4382.3	8.0647	0.11965	3842.2	4380.6	8.0091	0.10762	3840.7	4378.8	7.9593	0.11707	4040.4	4625.7	8.1612	0.12648		
1000	0.14645	4042.9	4628.7	8.2662	0.13013	4041.6	4627.2	8.2108	0.11707	4040.4	4625.7	8.1612	0.12648	4245.6	4878.0	8.3520	0.13587		
1100	0.15817	4248.0	4880.6	8.4567	0.14056	4246.8	4879.3	8.4015	0.12648	4245.6	4878.0	8.3520	0.13587	4456.3	5135.7	8.5331	0.14526		
1200	0.16987	4458.6	5138.1	8.6376	0.15098	4457.5	5136.9	8.5825	0.13587	4456.3	5135.7	8.5331	0.14526	4672.0	5398.2	8.7055			
1300	0.18156	4674.3	5400.5	8.8100	0.16139	4673.1	5399.4	8.7549	0.14526	4672.0	5398.2	8.7055							
P = 6.0 MPa (275.64°C)					P = 7.0 MPa (285.88°C)					P = 8.0 MPa (295.06°C)									
Sat.	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892	0.02737	2580.5	2772.1	5.8133	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.02426	2590.9	2785.0	5.7906	0.02995		
300	0.03616	2667.2	2884.2	6.0674	0.02947	2632.2	2838.4	5.9305	0.02426	2590.9	2785.0	5.7906	0.02995	2747.7	2987.3	6.1301	0.03432		
350	0.04223	2789.6	3043.0	6.3335	0.03524	2769.4	3016.0	6.2283	0.02995	2747.7	2987.3	6.1301	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.03817		
400	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408	0.03993	2878.6	3158.1	6.4478	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.03817	2966.7	3272.0	6.5551	0.04175		
450	0.05214	2988.9	3301.8	6.7193	0.04416	2978.0	3287.1	6.6327	0.03817	2966.7	3272.0	6.5551	0.04175	3064.3	3398.3	6.7240	0.04516		
500	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803	0.04814	3073.4	3410.3	6.7975	0.04175	3064.3	3398.3	6.7240	0.04516	3159.8	3521.0	6.8778	0.04845		
550	0.06101	3174.6	3540.6	7.0288	0.05195	3167.2	3530.9	6.9486	0.04516	3159.8	3521.0	6.8778	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.05481		
600	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677	0.05565	3260.7	3650.3	7.0894	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.06097		
700	0.07352	3453.1	3894.2	7.4234	0.06283	3448.5	3888.3	7.3476	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.06097	3636.0	4123.8	7.5173	0.06702		
800	0.08160	3643.1	4132.7	7.6566	0.06981	3639.5	4128.2	7.5822	0.06097	3636.0	4123.8	7.5173	0.06702	3832.1	4368.3	7.7351	0.07301		
900	0.08958	3837.8	4375.3	7.8727	0.07669	3835.0	4371.8	7.7991	0.06702	3832.1	4368.3	7.7351	0.07301	4032.8	4616.9	7.9384	0.07896		
1000	0.09749	4037.8	4622.7	8.0751	0.08350	4035.3	4619.8	8.0020	0.07301	4032.8	4616.9	7.9384	0.07896	4238.6	4870.3	8.1300	0.08489		
1100	0.10536	4243.3	4875.4	8.2661	0.09027	4240.9	4872.8	8.1933	0.08489	4449.5	5128.5	8.3115	0.09080	4665.0	5391.5	8.4842			
1200	0.11321	4454.0	5133.3	8.4474	0.09703	4451.7	5130.9	8.3747	0.09080	4665.0	5391.5	8.4842							
1300	0.12106	4669.6	5396.0	8.6199	0.10377	4667.3	5393.7	8.5475											
P = 9.0 MPa (303.40°C)					P = 10.0 MPa (318.351.06°C)					P = 12.5 MPa (327.89°C)									
Sat.	0.02048	2557.8	2742.1	5.6772	0.018026	2544.4	2724.7	5.6141	0.013495	2505.1	2673.8	5.4624	0.016126	2624.6	2826.2	5.7118	0.02000		
325	0.02327	2646.6	2856.0	5.8712	0.019861	2610.4	2809.1	5.7568	0.016126	2624.6	2826.2	5.7118	0.02000	2789.3	3039.3	6.0417	0.02299		
350	0.02580	2724.4	2956.6	6.0361	0.02242	2699.2	2923.4	5.9443	0.02000	2789.3	3039.3	6.0417	0.02299	2912.5	3199.8	6.2719	0.02560		
400	0.02993	2848.4	3117.8	6.2854	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120	0.02299	2912.5	3199.8	6.2719	0.02560	3021.7	3341.8	6.4618	0.02801		
450	0.03350	2955.2	3256.6	6.4844	0.02975	2943.4	3240.9	6.4190	0.02801	3125.0	3475.2	6.6290	0.03029	3225.4	3604.0	6.7810	0.03248		
500	0.03677	3055.2	3386.1	6.6576	0.03279	3045.8	3373.7	6.5966	0.03029	3225.4	3604.0	6.7810	0.03248	3324.4	3730.4	6.9218	0.03460		
550	0.03987	3152.2	3511.0	6.8142	0.03564	3144.6	3500.9	6.7561	0.03460	3422.9	3855.3	7.0536	0.03869	3620.0	4103.6	7.2965	0.04267		
600	0.04285	3248.1	3633.7	6.9589	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029	0.04267	3819.1	4352.5	7.5182	0.04658	4021.6	4603.8	7.7237	0.05045		
650	0.04574	3343.6	3755.3	7.0943	0.04101	3338.2	3748.2	7.0398	0.04658	4021.6	4603.8	7.7237	0.05045	4228.2	4858.8	7.9165	0.05430		
700	0.04857	3439.3	3876.5	7.2221	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687	0.05430	4439.3	5118.0	8.0937	0.05813	4654.8	5381.4	8.2717			
800	0.05409	3632.5	4119.3	7.4596	0.04859	3628.9	4114.8	7.4077	0.05813	4654.8	5381.4	8.2717							
900	0.05950	3829.2	4364.8	7.6783	0.05349	3826.3	4361.2	7.6272											
1000	0.06485	4030.3	4614.0	7.8821	0.05832	4027.8	4611.0	7.8315											
1100	0.07016	4236.3	4867.7	8.0740	0.06312	4234.0	4865.1	8.0237											
1200	0.07544	4447.2	5126.2	8.2556	0.06789	4444.9	5123.8	8.2055											
1300	0.08072	4662.7	5389.2	8.4284	0.07265	4460.5	5387.0	8.3783											

ตาราง ข.2 ตารางไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

Superheated water (Concluded)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K		
$P = 15.0 \text{ MPa (342.24}^{\circ}\text{C)}$					$P = 17.5 \text{ MPa (354.75}^{\circ}\text{C)}$					$P = 20.0 \text{ MPa (365.81}^{\circ}\text{C)}$				
Sat.	0.010337	2455.5	2610.5	5.3098	0.007920	2390.2	2528.8	5.1419	0.005834	2293.0	2409.7	4.9269		
350	0.011470	2520.4	2692.4	5.4421										
400	0.015649	2740.7	2975.5	5.8811	0.012447	2685.0	2902.9	5.7213	0.009942	2619.3	2818.1	5.5540		
450	0.018445	2879.5	3156.2	6.1404	0.015174	2844.2	3109.7	6.0184	0.012695	2806.2	3060.1	5.9017		
500	0.02080	2996.6	3308.6	6.3443	0.017358	2970.3	3274.1	6.2383	0.014768	2942.9	3238.2	6.1401		
550	0.02293	3104.7	3448.6	6.5199	0.019288	3083.9	3421.4	6.4230	0.016555	3062.4	3393.5	6.3348		
600	0.02491	3208.6	3582.3	6.6776	0.02106	3191.5	3560.1	6.5866	0.018178	3174.0	3537.6	6.5048		
650	0.02680	3310.3	3712.3	6.8224	0.02274	3296.0	3693.9	6.7357	0.019693	3281.4	3675.3	6.6582		
700	0.02861	3410.9	3840.1	6.9572	0.02434	3398.7	3824.6	6.8736	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993		
800	0.03210	3610.9	4092.4	7.2040	0.02738	3601.8	4081.1	7.1244	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544		
900	0.03546	3811.9	4343.8	7.4279	0.03031	3804.7	4335.1	7.3507	0.02645	3797.5	4326.4	7.2830		
1000	0.03875	4015.4	4596.6	7.6348	0.03316	4009.3	4589.5	7.5589	0.02897	4003.1	4582.5	7.4925		
1100	0.04200	4222.6	4852.6	7.8283	0.03597	4216.9	4846.4	7.7531	0.03145	4211.3	4840.2	7.6874		
1200	0.04523	4433.8	5112.3	8.0108	0.03876	4428.3	5106.6	7.9360	0.03391	4422.8	5101.0	7.8707		
1300	0.04845	4649.1	5376.0	8.1840	0.04154	4643.5	5370.5	8.1093	0.03636	4638.0	5365.1	8.0442		
$P = 25.0 \text{ MPa}$					$P = 30.0 \text{ MPa}$					$P = 35.0 \text{ MPa}$				
375	0.0019731	1798.7	1848.0	4.0320	0.0017892	1737.8	1791.5	3.9305	0.0017003	1702.9	1762.4	3.8722		
400	0.006004	2430.1	2580.2	5.1418	0.002790	2067.4	2151.1	4.4728	0.002100	1914.1	1987.6	4.2126		
425	0.007881	2609.2	2806.3	5.4723	0.005303	2455.1	2614.2	5.1504	0.003428	2253.4	2373.4	4.7747		
450	0.009162	2720.7	2949.7	5.6744	0.006735	2619.3	2821.4	5.4424	0.004961	2498.7	2672.4	5.1962		
500	0.011123	2884.3	3162.4	5.9592	0.008678	2820.7	3081.1	5.7905	0.006927	2751.9	2994.4	5.6282		
550	0.012724	3017.5	3335.6	6.1765	0.010168	2970.3	3275.4	6.0342	0.008345	2921.0	3213.0	5.9026		
600	0.014137	3137.9	3491.4	6.3602	0.011446	3100.5	3443.9	6.2331	0.009527	3062.0	3395.5	6.1179		
650	0.015433	3251.6	3637.4	6.5229	0.012596	3221.0	3598.9	6.4058	0.010575	3189.8	3559.9	6.3010		
700	0.016646	3361.3	3777.5	6.6707	0.013661	3335.8	3745.6	6.5606	0.011533	3309.8	3713.5	6.4631		
800	0.018912	3574.3	4047.1	6.9345	0.015623	3555.5	4024.2	6.8332	0.013278	3536.7	4001.5	6.7450		
900	0.021045	3783.0	4309.1	7.1680	0.017448	3768.5	4291.9	7.0718	0.014883	3754.0	4274.9	6.9386		
1000	0.02310	3990.9	4568.5	7.3802	0.019196	3978.8	4554.7	7.2867	0.016410	3966.7	4541.1	7.2064		
1100	0.02512	4200.2	4828.2	7.5765	0.020903	4189.2	4816.3	7.4845	0.017895	4178.3	4804.6	7.4037		
1200	0.02711	4412.0	5089.9	7.7605	0.022589	4401.3	5079.0	7.6692	0.019360	4390.7	5068.3	7.5910		
1300	0.02910	4626.9	5354.4	7.9342	0.024266	4616.0	5344.0	7.8432	0.020815	4605.1	5333.6	7.7653		
$P = 40.0 \text{ MPa}$					$P = 50.0 \text{ MPa}$					$P = 60.0 \text{ MPa}$				
375	0.0016407	1677.1	1742.8	3.8290	0.0015594	1638.6	1716.6	3.7639	0.0015028	1609.4	1699.5	3.7141		
400	0.0019077	1854.6	1930.9	4.1135	0.0017309	1788.1	1874.6	4.0031	0.0016335	1745.4	1843.4	3.9318		
425	0.002532	2096.9	2198.1	4.5029	0.002007	1959.7	2060.0	4.2734	0.0018165	1892.7	2001.7	4.1626		
450	0.003693	2365.1	2512.8	4.9459	0.002486	2159.6	2284.0	4.5884	0.002085	2053.9	2179.0	4.4121		
500	0.005622	2678.4	2903.3	5.4700	0.003892	2525.5	2720.1	5.1726	0.002956	2390.6	2567.9	4.9321		
550	0.006984	2869.7	3149.1	5.7785	0.005118	2763.6	3019.5	5.5485	0.003956	2658.8	2896.2	5.3441		
600	0.008094	3022.6	3346.4	6.0144	0.006112	2942.0	3247.6	5.8178	0.004834	2861.1	3151.2	5.6452		
650	0.009063	3158.0	3520.6	6.2054	0.006966	3093.5	3441.8	6.0342	0.005595	3028.8	3364.5	5.8829		
700	0.009941	3283.6	3681.2	6.3750	0.007727	3230.5	3616.8	6.2189	0.006272	3177.2	3553.5	6.0824		
800	0.011523	3517.8	3978.7	6.6662	0.009076	3479.8	3933.6	6.5290	0.007459	3441.5	3889.1	6.4109		
900	0.012962	3739.4	4257.9	6.9150	0.010283	3710.3	4224.4	6.7882	0.008508	3681.0	4191.5	6.6805		
1000	0.014324	3954.6	4527.6	7.1356	0.011411	3930.5	4501.1	7.0146	0.009480	3906.4	4475.2	6.9127		
1100	0.015642	4167.4	4793.1	7.3364	0.012496	4145.7	4770.5	7.2184	0.010409	4124.1	4748.6	7.1195		
1200	0.016940	4380.1	5057.7	7.5224	0.013561	4359.1	5037.2	7.4058	0.011317	4338.2	5017.2	7.3083		
1300	0.018229	4594.3	5323.5	7.6969	0.014616	4572.8	5303.6	7.5808	0.012215	4551.4	5284.3	7.4837		

ตาราง ข.3 ตารางน้ำอัดตัว

H₂O

Compressed liquid water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
P = 5 MPa (263.99°C)					P = 10 MPa (311.06°C)				P = 15 MPa (342.24°C)			
Sat.	0.0012859	1147.8	1154.2	2.9202	0.0014524	1393.0	1407.6	3.3596	0.0016581	1585.6	1610.5	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.04	0.0001	0.0009952	0.09	10.04	0.0002	0.0009928	0.15	15.05	0.0004
20	0.0009995	83.65	88.65	0.2956	0.0009972	83.36	93.33	0.2945	0.0009950	83.06	97.99	0.2934
40	0.0010056	166.95	171.97	0.5705	0.0010034	166.35	176.38	0.5686	0.0010013	165.76	180.78	0.5666
60	0.0010149	250.23	255.30	0.8285	0.0010127	249.36	259.49	0.8258	0.0010105	248.51	263.67	0.8232
80	0.0010268	333.72	338.85	1.0720	0.0010245	332.59	342.83	1.0688	0.0010222	331.48	346.81	1.0656
100	0.0010410	417.52	422.72	1.3030	0.0010385	416.12	426.50	1.2992	0.0010361	414.74	430.28	1.2955
120	0.0010576	501.80	507.09	1.5233	0.0010549	500.08	510.64	1.5189	0.0010522	498.40	514.19	1.5145
140	0.0010768	586.76	592.15	1.7343	0.0010737	584.68	595.42	1.7292	0.0010707	582.66	598.72	1.7242
160	0.0010988	672.62	678.12	1.9375	0.0010953	670.13	681.08	1.9317	0.0010918	667.71	684.09	1.9260
180	0.0011240	759.63	765.25	2.1341	0.0011199	756.65	767.84	2.1275	0.0011159	753.76	770.50	2.1210
200	0.0011530	848.1	853.9	2.3255	0.0011480	844.5	856.0	2.3178	0.0011433	841.0	858.2	2.3104
220	0.0011866	938.4	944.4	2.5128	0.0011805	934.1	945.9	2.5039	0.0011748	929.9	947.5	2.4953
240	0.0012264	1031.4	1037.5	2.6979	0.0012187	1026.0	1038.1	2.6872	0.0012114	1020.8	1039.0	2.6771
260	0.0012749	1127.9	1134.3	2.8830	0.0012645	1121.1	1133.7	2.8699	0.0012550	1114.6	1133.4	2.8576
280					0.0013216	1220.9	1234.1	3.0548	0.0013084	1212.5	1232.1	3.0393
300					0.0013972	1328.4	1342.3	3.2469	0.0013770	1316.6	1337.3	3.2260
320									0.0014724	1431.1	1453.2	3.4247
340									0.0016311	1567.5	1591.9	3.6546
P = 20 MPa (365.81°C)					P = 30 MPa				P = 50 MPa			
Sat.	0.002036	1785.6	1826.3	4.0139	0.0009856	0.25	29.82	0.0001	0.0009766	0.20	49.03	0.0014
0	0.0009904	0.19	20.01	0.0004	0.0009886	82.17	111.84	0.2899	0.0009804	81.00	130.02	0.2848
20	0.0009928	82.77	102.62	0.2923	0.0009951	164.04	193.89	0.5607	0.0009872	161.86	211.21	0.5527
40	0.0009992	165.17	185.16	0.5646	0.0010042	246.06	276.19	0.8154	0.0009962	242.98	292.79	0.8052
60	0.0010084	247.68	267.85	0.8206	0.0010156	328.30	358.77	1.0561	0.0010073	324.34	374.70	1.0440
80	0.0010199	330.40	350.80	1.0624	0.0010290	410.78	441.66	1.2844	0.0010201	405.88	456.89	1.2703
100	0.0010337	413.39	434.06	1.2917	0.0010445	493.59	524.93	1.5018	0.0010348	487.65	539.39	1.4857
120	0.0010496	496.76	517.76	1.5102	0.0010621	576.88	608.75	1.7098	0.0010515	569.77	622.35	1.6915
140	0.0010678	580.69	602.04	1.7193	0.0010821	660.82	693.28	1.9096	0.0010703	652.41	705.92	1.8891
160	0.0010885	665.35	687.12	1.9204	0.0011047	745.59	778.73	2.1024	0.0010912	735.69	790.25	2.0794
180	0.0011120	750.95	773.20	2.1147	0.0011302	831.4	865.3	2.2893	0.0011146	819.7	875.5	2.2634
200	0.0011388	837.7	860.5	2.3031	0.0011590	918.3	953.1	2.4711	0.0011408	904.7	961.7	2.4419
220	0.0011695	925.9	949.3	2.4870	0.0011920	1006.9	1042.6	2.6490	0.0011702	990.7	1049.2	2.6158
240	0.0012046	1016.0	1040.0	2.6674	0.0012303	1097.4	1134.3	2.8243	0.0012034	1078.1	1138.2	2.7860
260	0.0012462	1108.6	1133.5	2.8459	0.0012755	1190.7	1229.0	2.9986	0.0012415	1167.2	1229.3	2.9537
280	0.0012965	1204.7	1230.6	3.0248	0.0013304	1287.9	1327.8	3.1741	0.0012860	1258.7	1323.0	3.1200
300	0.0013596	1306.1	1333.3	3.2071	0.0013997	1390.7	1432.7	3.3539	0.0013388	1353.3	1420.2	3.2868
320	0.0014437	1415.7	1444.6	3.3979	0.0014920	1501.7	1546.5	3.5426	0.0014032	1452.0	1522.1	3.4557
340	0.0015684	1539.7	1571.0	3.6075	0.0016265	1626.6	1675.4	3.7494	0.0014838	1556.0	1630.2	3.6291
360	0.0018226	1702.8	1739.3	3.8772	0.0018691	1781.4	1837.5	4.0012	0.0015884	1667.2	1746.6	3.8101
380												